



BOLETÍN TÉCNICO DE INGENIERÍA



Mayo 2019
Número 16



**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE ARMAS NAVALES
(ETSIA-JEPER-DIENA)**



MINISTERIO DE DEFENSA

Edita:



NIPO: 083-17-202-1 (edición en línea)

NIPO: 083-17-203-7 (impreso bajo demanda)

ISSN: 2659-6458 (edición en línea)

Este Boletín se puede solicitar en papel en la modalidad de impresión bajo demanda.

Los números editados se pueden consultar en formato electrónico en:

<https://publicaciones.defensa.gob.es/revistas.html>

App Revistas Defensa: disponible en tienda

Google Play (<http://play.google.com/store>) para dispositivos Android, y en AppStore para iPhones y iPads.

A NUESTROS COLABORADORES

El acuse de recibo de los artículos enviados por nuestros estimados colaboradores no supone, por parte del BOLETÍN, compromiso de publicación. Normalmente no se devolverán los originales ni se sostendrá correspondencia sobre ellos hasta transcurridos seis meses de la fecha de su recibo, en cuyo momento el colaborador que los desee podrá reclamar la devolución.

Los originales habrán de ser inéditos, escritos en *Word* y se entregarán por vía informática (*Internet*, *Lotus Notes*) o grabados en CD. La extensión del texto no sobrepasarán las seis páginas y se presentará escrito a un espacio. La Redacción se reserva la aplicación de las correcciones ortográficas o de estilo que considere necesarias.

Las siglas y acrónimos se aclararán con su significado completo la primera vez que se utilicen (excepto las muy conocidas: ONU, OTAN, etc.) y deben corresponder a su versión en español cuando la haya (OTAN en lugar de NATO, Marina de los Estados Unidos en vez de *US Navy*, etcétera).

Las fotografías, gráficos e ilustraciones se acompañarán con un pie o título y tendrán una resolución de 300 dpi como mínimo, preferiblemente en formato JPG. Si no son del propio autor, se citará su procedencia y el autor realizará los trámites precisos para que se autorice su publicación. El BOLETÍN no se responsabilizará del incumplimiento de este requisito. Las ilustraciones enviadas en papel pasarán a formar parte del archivo del BOLETÍN y solo se devolverán en casos excepcionales.

Se citará la bibliografía consultada.

Al final del artículo se incluirá el nombre y apellidos del autor, su categoría o profesión, el NIF, la dirección completa, con distrito postal, el número de teléfono y su dirección de correo electrónico.

Maquetación:

M^a José Pizarro García

Índice

EDITORIAL	Pág. 3
APLICACIONES DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL EN EL ÁMBITO DE LA INGENIERÍA	Pág. 5
CF (CIA) D. Pedro Antonio Casas Alcaide	
APROXIMACIÓN A LA CARACTERIZACIÓN DE LOS BUQUES DE GUERRA A PARTIR DE SU DISEÑO Y EMPLEO OPERACIONAL EN LA ARMADA NACIONAL	Pág. 17
CFLPRO D. José David Peroza Daza	
CNESP D. Camilo Ernesto Segovia Forero	
EL CARAJO Y LA COFA	Pág. 35
CC (CIA) D. Raúl Villa Caro	
LA SINCRONIZACIÓN Y SU PROBLEMÁTICA EN LAS COMUNICACIONES DE BANDA ANCHA	Pág. 41
AF (CGA) D. Eduardo de Maradiaga Sánchez	
INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE CLASIFICACIÓN Y REGRESIÓN ASOCIADAS AL APRENDIZAJE AUTOMÁTICO	Pág. 49
D. Pablo Lucas Cánovas	
AN (CIA) D. Francisco Lamas López	
SISTEMA DE APOYO A LA DECISIÓN EN INDUSTRIA NAVAL	Pág. 59
D. P. Pérez Sabater	
AN (CIA) D. Francisco Lamas López	
BIOGRAFÍA	Pág. 69

Foto portada: Salida de Rota. Fragata Numancia

Autor: AF ALUM. D. Carlos Celedonio Ameyugo Fernández del Campo.



EDITORIAL

**El capitán de navío del Cuerpo de Ingenieros
Comandante-director de la ETSIAN**

Estimados amigos y compañeros,

Quiero aprovechar la ocasión que me brinda la publicación del decimosexto Boletín Técnico de Ingeniería para agradecer al capitán de navío D. Gustavo Almarza Pozuelo toda la dedicación que ha tenido a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Armas Navales, no solo en su última etapa como comandante-director, sino también a lo largo de los muchos años que ha dedicado a esta escuela como profesor de la misma.

Este año se conmemora el 75 aniversario de la designación como primer director de Escuela de Armas Navales, el 10 de noviembre de 1944, al coronel de Ingenieros de Armas Navales D. Amador Villar Marín. Al año siguiente el Ministro de Marina, el Vicealmirante Moreno, inauguró el primer curso que fue impartido provisionalmente en los talleres y laboratorios del Estado Mayor de la Armada mientras se construía la actual ETSIAN. Desde entonces un total de cuarenta promociones han completado sus estudios y obtenido el título de Ingeniero de Armas Navales.

Transcurrido este tiempo, la ETSIAN se enfrenta a dos retos importantes:

En primer lugar, el conocido como Proceso de Bolonia ha traído consigo la implantación de un Espacio Europeo de Educación Superior (EEES) y la armonización de la enseñanza superior en un total de 47 países, ha obligado a evolucionar el tradicional Curso para la Obtención del Título de Ingenieros de Armas Navales con una duración de tres años al que se accedían oficial del Cuerpo General (CG) de la Armada en un Máster con una duración de dos años. La primera edición del Máster en Ingeniería de Armas Navales (IAN), dirigido a quien esté en posesión de cualquier título de grado en ingeniería reconocido por la legislación vigente, supone una oportunidad para ampliar el número de alumnos, tradicionalmente limitado a la disponibilidad de Oficiales de CG. A partir del próximo mes de septiembre podrán recibir el Máster IAN graduados en ingeniería tanto civiles como militares, nacionales o extranjeros, que una vez completado el mismo estarán capacitados para ejercer una Profesión Regulada y reconocida en todo el EEES: la de Ingeniero de Armas Navales.

En segundo lugar, la conocida como Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0, supone la incorporación en todos los ámbitos de una serie de tecnologías habilitadoras como puede ser la fabricación aditiva o la robótica colaborativa en las que habrá que formar a los futuros Ingenieros de Armas Navales.

Este 16º BTI incluye artículos técnicos muy interesantes que afectan a las diversas áreas de la ingeniería y os animo a emplear este medio para divulgar vuestro trabajo como Ingenieros de la Armada. Destacar especialmente en este número la colaboración de nuestros compañeros de la Armada de la República de Colombia a quienes animo a seguir empleando este BTI para compartir con nosotros su experiencia.

Un fuerte abrazo a todos.

APLICACIONES DEL ANÁLISIS DIMENSIONAL EN EL ÁMBITO DE LA INGENIERÍA

CF (CIA) D. PEDRO ANTONIO CASAS ALCAIDE

Doctor Ingeniero Naval por la UPM
JAL-DIC

Resumen.- En este documento se presenta una breve introducción al uso de las técnicas de análisis dimensional en el ámbito de la ingeniería y se desarrollan varios ejemplos de aplicación sencillos al objeto de ilustrar los detalles más significativos de un esquema procedimental usado por el autor en múltiples ocasiones.

1. Introducción

El análisis dimensional es una disciplina que alcanza su madurez a principios del siglo XX con la aparición del teorema de Buckingham (ver [1]), pudiendo considerarse una de las herramientas más versátiles a disposición de cualquier ingeniero.

Sus aplicaciones en el ámbito de la ingeniería son muchas y variadas, aunque según la experiencia del autor, cualquiera de ellas podrá clasificarse según dos situaciones básicas: cuando hay disponible un modelo matemático del problema a resolver y cuando no lo hay.

En la primera de las dos situaciones, el análisis dimensional cobra especial interés si el modelo disponible es de difícil resolución analítica, en cuyo caso aparece una serie de aplicaciones típicas:

- Organización sistemática de cualquier programa de ensayos (experimentales y/o de carácter numérico) que se decida llevar a cabo, en base a los parámetros no dimensionales que gobiernan el problema.
- Establecimiento de las leyes de similitud que permitirán el adecuado cambio de escala de los datos disponibles (obtenidos en ensayos y/o en problemas reales similares), en base igualmente a los parámetros arriba citados.
- Identificación de los términos que no contribuyen significativamente a la solución del problema y obtención racional de modelos matemáticos simplificados, en base una vez más a los parámetros arriba citados.

En la segunda de las dos situaciones arriba indicadas (cuando la complejidad del problema y/o la falta de recursos impiden disponer de un modelo matemático) aparece una aplicación adicional a las ya citadas muy interesante: la posibilidad de identificar directamente expresiones de carácter global (dependientes de una serie finita de constantes, a determinar en cada caso) a partir de una cierta cantidad de información previa.

Este trabajo se centrará en esta última aplicación, para lo cual se empezará por describir los pasos básicos de un esquema procedimental de tipo heurístico que el autor ha usado con éxito en múltiples ocasiones.

PASO A: Lo primero es identificar las variables que presumiblemente tendrán una contribución relevante en el fenómeno bajo estudio. En este sentido, y por desgracia, no hay reglas fijas, no quedando otra solución que acudir a la experiencia personal de cada uno (conocimiento que se tenga sobre problemas similares, etc.).

Se hace notar que la omisión de cualquier variable relevante dejará irremediadamente fuera del problema todos los posibles efectos asociados a la misma. Aunque a veces esto implicará la inaceptabilidad total del

resultado, lo usual es que únicamente implique una utilidad limitada de dicho resultado, tal y como ocurre por ejemplo en los puntos 2, 3 y 4 de este documento.

PASO B: En segundo lugar deben identificarse las dimensiones físicas que intervienen en las variables establecidas en el paso A, y a continuación, se procede a establecer los parámetros no dimensionales que gobiernan el problema. Aunque hay varios métodos disponibles al efecto, para esta aplicación en concreto el autor recomienda el uso directo del teorema de Buckingham (ver [1]).

Conviene observar que no existe una solución única en relación con los parámetros no dimensionales obtenidos (su número será siempre el mismo pero la forma de cada uno de ellos cambiará en función del criterio usado para obtenerlos) y que en ciertos casos puede resultar difícil determinar cuál de las diferentes opciones resultará más ventajosa de cara al paso siguiente.

PASO C: Finalmente se aplica todo el conocimiento disponible (principios físicos básicos, simplificaciones basadas en experiencia previa, etc.) al objeto de obtener una relación entre los parámetros no dimensionales arriba citados que pueda expresarse en función de un grupo finito (lo más reducido posible) de constantes, las cuales deberán ser determinadas inevitablemente por otras vías.

Es importante comprender que nada garantiza el éxito en este último paso, dependiendo el resultado obtenido de múltiples factores: dificultad intrínseca del problema, experiencia y conocimientos del personal participante, rango de aplicabilidad exigido al citado resultado, etc.

Al objeto de ilustrar los detalles de todo lo expuesto hasta el momento, en los puntos siguientes se desarrollarán tres ejemplos de aplicación sencillos:

- El cálculo de la velocidad de penetración de un proyectil en corazas de acero planas.
- El cálculo del par máximo obtenible de un motor eléctrico rotativo funcionando en régimen continuo.
- El cálculo del par necesario para que un buque pueda girar sobre sí mismo en régimen estacionario (a velocidad angular constante).

Se incluye también al final del documento una serie de reflexiones sobre el uso del teorema de Buckingham así como sobre dos conceptos importantes en relación con la naturaleza heurística del esquema descrito: el sesgo y la dispersión.

2. Velocidad de penetración de un proyectil en corazas de acero planas

En este punto se desarrollará una expresión para calcular la velocidad de penetración de un proyectil usando el esquema procedimental indicado en la introducción, unos pocos conocimientos básicos de física y las hipótesis simplificadoras siguientes:

H2.1.- Se supondrán corazas planas hechas de acero homogéneo, isotrópico y con niveles de tenacidad típicos en construcción naval.

H2.2.- Exteriormente, los proyectiles se supondrán geoméricamente semejantes y con la forma de un cuerpo de revolución de perfil aerodinámico (base plana y frente apuntado).

H2.3.- El eje del proyectil coincidirá con la dirección de su velocidad en el momento del impacto.

H2.4.- Se asume que el proyectil es esencialmente rígido, es decir, que no se deforma de manera significativa durante el proceso de penetración.

Tabla 2.1.- Nomenclatura del punto 2

A	Ángulo de incidencia del proyectil sobre la coraza
t	Espesor de la coraza (m)
v	Velocidad de penetración (m/s)
m	Masa del proyectil (kg)
d	Diámetro del proyectil (m)
e	Límite elástico del acero de la coraza (N/m ²)
Mayúscula	Cantidad NO DIMENSIONAL
Minúscula	Cantidad con DIMENSIONES FISICAS

Al objeto de establecer un marco conceptual claro, se definirá la velocidad de penetración como la velocidad mínima en el momento del impacto que un proyectil dado, incidiendo con un ángulo dado, necesita para traspasar por completo una coraza dada.

PASO A: A la vista de lo anterior, es razonable suponer que la velocidad de penetración pueda describirse en función de las siguientes variables:

- Masa del proyectil.
- Diámetro del proyectil.
- Espesor de la coraza.
- Límite elástico del acero de la coraza.
- Ángulo de incidencia entre coraza y proyectil.

PASO B: Observando que en este caso únicamente hay tres dimensiones (masa, longitud y tiempo) y aplicando el teorema de Buckingham (ver [1]), resulta fácil alcanzar el siguiente resultado, que tal y como ya se ha dicho, no es el único posible:

$$\frac{mv^2}{ed^3} = F\left(\frac{t}{d}, A\right) \quad (2.1)$$

En donde el miembro de la derecha es una función de tipo genérico (F) que incluye únicamente dos variables independientes (Nótese que solo por el hecho de haber descrito el problema en términos no dimensionales se han reducido las variables independientes de cinco a dos).

PASO C: La igualdad 2.1 constituye el máximo nivel de detalle al que se puede aspirar en base a un análisis dimensional puro, pero introduciendo algo de física básica resulta posible avanzar un poco más. Para empezar, conviene tener en cuenta que la velocidad de penetración de un proyectil:

- Deberá ser nula cuando el espesor de la coraza sea igualmente nulo.
- Aumentará conforme lo haga el valor de dicho espesor.
- Deberá tender a infinito conforme se aproxime el caso de incidencia paralela a la coraza.
- Disminuirá hasta alcanzar un valor mínimo para ángulos de incidencia nulos (incidencia perpendicular a la coraza).

A la vista de lo anterior, es razonable suponer que la expresión 2.1 pueda describirse del siguiente modo:

$$\frac{mv^2}{ed^3} = Q \left(\frac{t}{d}\right)^K \left(\frac{1}{\cos A}\right)^C \quad (2.2)$$

En donde Q , K y C son tres constantes no dimensionales que deberán ajustarse de manera empírica mediante procedimientos que no serán descritos en el presente documento (experimentación, tratamiento estadístico de datos obtenidos en casos reales, etc.).

Una vez en este punto, todavía resulta posible avanzar mediante razonamientos físicos sencillos. En efecto, suponiendo que la capacidad de penetración del proyectil sea proporcional a aquella fracción de su energía cinética proyectada normalmente sobre la coraza, se obtienen unos valores de K y C iguales a 1 y 2 respectivamente, siendo posible de esta forma llegar a la siguiente expresión:

$$\frac{m}{et} \left(\frac{v}{d} \cos A\right)^2 = Q \quad (2.3)$$

En donde Q sería ahora la única constante a determinar (Nótese que se ha pasado de una función F completamente genérica a otra cuya estructura depende solamente de una constante indeterminada).

Tal y como ya se ha dicho, no hay nada que garantice la validez de 2.3. No obstante, basta con que las suposiciones efectuadas sean razonables (no hace falta que sean correctas del todo) para que se pueda ajustar el valor de Q en base a los datos experimentales disponibles sin problemas excesivos, y por tanto, para considerar a la expresión 2.3 al menos como una primera aproximación.

Finalmente, y a pesar de la complejidad del problema tratado, puede decirse que la expresión 2.3 funcionará bien para procesos de penetración esencialmente estáticos y gobernados por la plastificación del acero de la coraza (ver [2]). Si se desea mayor generalidad, no quedará más remedio que introducir variables adicionales, como por ejemplo (y sin ánimo de ser exhaustivo):

- La densidad del material de la coraza para tener en cuenta efectos de frenado debidos a la inercia de dicho material.
- Las velocidades del sonido en el material tanto del proyectil como de la coraza para incluir fenómenos de interacción elástico/dinámicos.
- Coeficientes de tipo termodinámico cuando la generación de calor durante el proceso de penetración sea importante.

3. Par máximo obtenible en motores eléctricos rotativos

En este punto se desarrollará una expresión para calcular el par máximo que puede obtenerse de un motor eléctrico rotativo funcionando en régimen continuo, usando al efecto el esquema procedimental indicado en la introducción, unos pocos conocimientos básicos de física y las hipótesis simplificadoras siguientes:

H3.1.- En cuanto a los detalles de disposición interior, se supondrá que todas las secciones transversales de todos los motores serán geoméricamente semejantes entre sí.

H3.2.- Los motores tendrán la forma exterior de un cilindro de sección circular y, a efectos eléctricos, podrán caracterizarse con un solo valor de la intensidad de corriente.

H3.3.- La temperatura del fluido usado como refrigerante se supondrá esencialmente constante y, en lo que a transmisión de calor se refiere, únicamente se tomará en consideración el material de los circuitos magnéticos.

Pero antes de calcular el par será necesario establecer un valor para el calentamiento (usando igualmente el esquema procedimental de la introducción, unos pocos conocimientos de física y las hipótesis arriba indicadas), el cual se definirá como el incremento de temperatura sobre la del fluido usado como refrigerante que sufre el motor eléctrico en funcionamiento continuo una vez alcanzado el régimen estacionario.

Tabla 3.1.- Nomenclatura del punto 3

<i>d</i>	Diámetro exterior de la máquina (m)
<i>l</i>	Longitud exterior de la máquina (m)
<i>c</i>	Conductividad térmica del material del circuito magnético (W/(mK))
<i>e</i>	Resistividad eléctrica de los elementos conductores (Wm/A ²)
<i>i</i>	Valor característico de la intensidad de corriente en los devanados (A)
<i>Δt</i>	Calentamiento (K)
<i>b</i>	Densidad de flujo magnético en el entrehierro (N/(mA))
<i>p</i>	Par (Nm)
<i>p_m</i>	Par máximo obtenible (Nm)
Mayúscula	Cantidad NO DIMENSIONAL
Minúscula	Cantidad con DIMENSIONES FISICAS

3.1. Calentamiento

PASO A: Tras un análisis rápido de las hipótesis establecidas, es razonable suponer que el calentamiento pueda describirse en función de las siguientes variables:

- Diámetro exterior de la máquina.
- Longitud de la máquina.
- Conductividad térmica del material del circuito magnético.
- Resistividad eléctrica de los elementos conductores.
- Intensidad de corriente eléctrica en los devanados.

PASO B: Observando que en este caso hay cinco dimensiones (masa, longitud, tiempo, temperatura e intensidad de corriente) y aplicando el teorema de Buckingham (ver [1]), resulta fácil alcanzar el siguiente resultado, que tal y como ya se ha dicho, no es el único posible:

$$\frac{cd^2\Delta t}{ei^2} = F\left(\frac{l}{d}\right) \quad (3.1)$$

En donde el miembro de la derecha es una función de tipo genérico (*F*) que incluye una sola variable independiente (Nótese que solo por el hecho de haber descrito el problema en términos no dimensionales se han reducido las variables independientes de cinco a una).

PASO C: Si se supone que el flujo de calor disipado ocurre en dirección radial (lo cual es bastante razonable dado que la fuente térmica principal, constituida por los conductores, se suele disponer en forma de capa concéntrica cercana a las capas de circulación del refrigerante), también resultará aceptable suponer que el calentamiento sea independiente de la longitud del motor, con lo cual la expresión 3.1 quedará del siguiente modo:

$$\frac{cd^2\Delta t}{ei^2} = Q \quad (3.2)$$

En donde Q será una constante no dimensional a determinar.

3.2. Par máximo obtenible

PASO A: Tras un análisis rápido del problema, parece razonable suponer que el par suministrado por cualquier motor eléctrico pueda describirse en función de las siguientes variables:

- Diámetro de la máquina.
- Longitud de la máquina.
- Densidad de flujo magnético existente en el entrehierro.
- Intensidad de corriente eléctrica en los devanados.

PASO B: Observando que en este caso hay cuatro dimensiones (masa, longitud, tiempo e intensidad de corriente) y aplicando el teorema de Buckingham (ver [1]), resulta fácil alcanzar el siguiente resultado, que tal y como ya se ha dicho, no es el único posible:

$$\frac{p}{bid^2} = F\left(\frac{l}{d}\right) \quad (3.3)$$

En donde el miembro de la derecha es una función de tipo genérico (F) que incluye una sola variable independiente (Nótese que solo por el hecho de haber descrito el problema en términos no dimensionales se han reducido las variables independientes de cuatro a una).

PASO C: Observando que, según la ley de Lorentz, la fuerza ejercida sobre los conductores debe ser proporcional a la longitud de los mismos y que dichos conductores se colocan paralelos al eje de giro de la máquina, el par resultará proporcional a la longitud de la máquina (al menos en una primera aproximación), con lo cual la expresión 3.3 quedará del siguiente modo:

$$\frac{p}{bild} = Q \quad (3.4)$$

En donde Q será una constante no dimensional a determinar.

Teniendo en cuenta que el calentamiento máximo permisible en el motor (sin deterioro de ninguna de sus partes) vendrá fijado por la calidad del aislamiento de los conductores y que los valores de la conductividad térmica y de la resistividad eléctrica pueden tomarse constantes en una primera aproximación, de la igualdad 3.2 se desprende que la relación existente entre la intensidad eléctrica que puede soportar la máquina y el diámetro de la misma deberá ser constante.

A la vista de lo anterior, y dado que el valor de la densidad de flujo vendrá limitado por la saturación del material constitutivo del circuito magnético de la máquina, de la igualdad 3.4 podrá derivarse finalmente lo siguiente:

$$\frac{p_m}{d^2 l} = k \quad (3.5)$$

En donde k será una constante (con las dimensiones de una tensión tangencial) a determinar de manera empírica, cuyo valor es de esperar que sufra cierta variación según el tipo de máquina considerado.

La expresión 3.5, que concuerda bien con la información disponible en la bibliografía (ver por ejemplo [3]), indica que el par máximo obtenible de un motor eléctrico resulta proporcional:

- Al cuadrado de su diámetro.
- A su longitud.

Esta última expresión resulta de gran utilidad, por ejemplo, en el diseño de submarinos, ya que el diámetro máximo del motor eléctrico de propulsión vendrá limitado por las formas de popa del casco resistente, lo cual limitará a su vez el par máximo que podrá suministrarse a la hélice salvo que se aumente la longitud del motor, y por lo tanto, de la cámara de máquinas.

4. Par necesario para producir el giro de un buque sobre sí mismo

En este punto se desarrollará una expresión para calcular el par necesario para producir el giro de un buque sobre sí mismo usando el esquema procedimental indicado en la introducción, unos pocos conocimientos básicos de hidrodinámica y las hipótesis simplificadoras siguientes:

H4.1.- Se supondrá velocidad de traslación nula en todo momento, ángulos de asiento y escora igualmente nulos, y giro en régimen estacionario (a velocidad angular constante).

H4.2.- Se supondrán buques monocasco con carenas:

- Simétricas respecto al plano de crujía.
- Geométricamente semejantes, aunque con tres factores de escala independientes (longitudinal, vertical y transversal).
- Esbeltas (relación eslora/manga elevada), de forma que resulte aceptable la condición de flujo bidimensional en cada rebanada transversal.

H4.3.- La contribución del campo gravitatorio (y por tanto, de cualquier efecto asociado a la formación de olas) se supondrá despreciable.

PASO A: Tras un análisis rápido del problema, parece razonable suponer que el par necesario para que un buque gire sobre sí mismo pueda describirse en función de las siguientes variables:

- Eslora máxima de la carena.
- Calado máximo de la carena.
- Manga máxima de la carena.
- Velocidad angular de giro.
- Viscosidad cinemática del agua de mar.
- Densidad del agua de mar.

Tabla 4.1.- Nomenclatura del punto 4

<i>e</i>	Eslora máxima de la carena (m)
<i>t</i>	Calado máximo de la carena (m)
<i>a</i>	Velocidad angular de giro (1/s)
<i>v</i>	Viscosidad cinemática del agua de mar (m ² /s)
<i>d</i>	Densidad del agua de mar (kg/m ³)
<i>p</i>	Par necesario para producir el giro (Nm)
<i>R</i>	Relación eslora/manga de la carena
<i>x</i>	Coordenada a lo largo de la eslora (m)
Mayúscula	Cantidad NO DIMENSIONAL
Minúscula	Cantidad con DIMENSIONES FISICAS

PASO B: Observando que en este caso únicamente hay tres dimensiones (masa, longitud y tiempo) y aplicando el teorema de Buckingham (ver [1]), resulta fácil alcanzar el siguiente resultado, que tal y como ya se ha dicho, no es el único posible:

$$\frac{p}{v^2 de} = F\left(\frac{t}{e}, \frac{ae^2}{v}, R\right) \quad (4.1)$$

En donde el miembro de la derecha es una función de tipo genérico (*F*) que incluye tres variables independientes (Nótese que solo por el hecho de haber descrito el problema en términos no dimensionales se han reducido las variables independientes de seis a tres).

PASO C: La expresión anterior es todo lo más que puede conseguirse en base al análisis dimensional en un sentido estricto. Sin embargo, con algo de información adicional podría alcanzarse un mayor grado de definición, tal y como se verá a continuación.

En primer lugar, conviene hacer dos observaciones importantes:

- El par de giro disminuirá conforme lo haga el calado, anulándose a efectos prácticos cuando este último tienda a cero.
- El par de giro disminuirá igualmente conforme lo haga la velocidad angular de giro, anulándose totalmente cuando esta última tienda a cero.

Bajo estas circunstancias, parece razonable suponer que la expresión anterior pueda describirse del siguiente modo:

$$\frac{p}{v^2 de} = G(R) \left(\frac{t}{e}\right)^K \left(\frac{ae^2}{v}\right)^C \quad (4.2)$$

En donde *G* vuelve a ser una función de tipo genérico mientras que *K* y *C* serán dos constantes no dimensionales indeterminadas (evidentemente positivas).

Por otro lado, es razonable esperar que el flujo alrededor de la carena de un buque girando sobre sí mismo esté gobernado fundamentalmente por fenómenos asociados al desprendimiento de la capa límite, lo cual hace posible desprestigiar el efecto de la viscosidad en una primera aproximación (ver referencia [1]) y, por tanto, fijar la constante C en un valor igual a 2.

En tercer lugar, de la referencia [1] se deduce que los coeficientes de resistencia de cuerpos bidimensionales geoméricamente semejantes no dependerán significativamente de su relación cuerda/espesor cuando el flujo esté gobernado por fenómenos asociados al desprendimiento de la capa límite (y siempre que se utilice el área frontal para definir dichos coeficientes), lo cual permitirá aplicar la hipótesis de flujo bidimensional a cada rebanada transversal suponiendo que el coeficiente de resistencia de cada una de ellas depende únicamente de su posición relativa a lo largo de la eslora (x/e) y obtener de este modo un valor de K igual a 1 y una función G de valor constante (independiente de R).

Y finalmente, tomando los resultados obtenidos en los dos últimos párrafos (C igual a 2, K igual a 1 y G de valor constante), la ecuación 4.2 adoptará la siguiente forma:

$$\frac{p}{tde^4a^2} = Q \quad (4.3)$$

En donde Q sería ahora la única constante (no dimensional) a determinar, una vez más mediante procedimientos empíricos.

Aunque no hay nada que garantice la validez de la expresión 4.3 en un sentido estricto, según la experiencia del autor es razonable esperar que pueda ajustarse el valor de Q en base a los datos experimentales disponibles sin encontrar dificultades excesivas.

Antes de terminar, conviene llamar la atención del lector sobre algo importante: la manera de producir físicamente el par de giro.

Este tema conduce a una problemática cuyo tratamiento dependerá de las alternativas disponibles al efecto (empujadores transversales situados en los extremos de proa/popa, propulsión de tipo acimutal, capacidad de ciaboga en buques con dos o más líneas de ejes, etc.) y que, dada su extensión, se ha dejado fuera de este trabajo.

5. Sesgo y dispersión

En relación con la naturaleza heurística del procedimiento indicado en la introducción, cabe hacer algunos comentarios sobre dos conceptos importantes: el sesgo y la dispersión (ver cualquier tratado de estadística para una definición formal de ambos).

El sesgo aparece porque las suposiciones/simplificaciones necesarias para completar los pasos A y C impedirán, en general, una predicción exacta de los valores medios obtenidos a partir de los datos disponibles, mientras que la dispersión aparecerá inevitablemente cuando hayan quedado sin identificar (durante la ejecución del paso A) variables importantes, ya que la contribución de estas últimas se manifestará en forma de fluctuaciones aleatorias adicionales al sesgo que pueda existir.

Dejando a un lado los errores asociados a los procedimientos de medida usados, es fácil ver que lo anterior conduce a tres tipos básicos de situaciones:

- Tipo 1: sesgo originado por la existencia de variables desechadas durante la ejecución del paso A.
- Tipo 2: sesgo introducido por las aproximaciones usadas al ejecutar el paso C.

- Tipo 3: dispersión originada por la existencia de variables desechadas durante la ejecución del paso A.

Tomando como ejemplo el par de giro de un buque (punto 4), el hecho de haber considerado únicamente carenas geoméricamente semejantes y despreciado la influencia del campo gravitatorio ha llevado a desechar parámetros no dimensionales como el coeficiente volumétrico (n/e^3) y el gravitacional (ea^2/g), por citar dos de los más significativos (nótese que n es el volumen de la carena y que g es la aceleración de la gravedad).

Si estos dos parámetros se tuviesen en cuenta, la expresión obtenida al final del punto 4 podría tener una estructura esencialmente distinta a la de la expresión 4.3 (incluso tomando dichos parámetros como constantes), y si este fuera el caso, el uso de esta última expresión como estimador de la primera conllevaría inevitablemente cierto nivel de sesgo, con lo que se estaría ante una situación tipo 1.

Suponiendo ahora que se han identificado correctamente todas las variables importantes al ejecutar el paso A (lo que implica poder despreciar la influencia del coeficiente volumétrico y del gravitacional), aun cabría la posibilidad de que la estructura de la expresión 4.3 no describiese adecuadamente la relación existente entre los cuatro parámetros no dimensionales incluidos en la ecuación 4.1, y si este fuera el caso, el uso de la expresión 4.3 como estimador de la 4.1 conllevaría inevitablemente cierto nivel de sesgo, con lo que se estaría ante una situación tipo 2.

Finalmente, podría suceder que la estructura de la ecuación 4.3 fuese esencialmente correcta y que, al mismo tiempo, la influencia de los coeficientes volumétrico y gravitacional no pudiese despreciarse, lo que conduciría en la práctica a tomar la constante Q como una función de estos últimos.

Suponiendo que estos dos parámetros fluctúen de forma aleatoria sin correlación alguna con el parámetro t/e (dado que este último es el único de los tres situados a la derecha de la ecuación 4.1 que ha sobrevivido tras completar el paso C), bajo ciertas condiciones sería posible eliminar el sesgo eligiendo adecuadamente el valor de la constante Q y dejar la dispersión asociada a las fluctuaciones arriba citadas como único fenómeno inevitable en el proceso de ajuste de dicha constante, con lo que se estaría ante una situación tipo 3.

Para terminar, cabe advertir que las tres situaciones ilustradas constituyen casos posibles aunque ciertamente extremos y que lo usual será la aparición de situaciones intermedias en las que se combinen simultáneamente características de estos tres casos extremos.

6. Limitaciones del teorema de Buckingham

Aunque el teorema de Buckingham permite la obtención directa de parámetros no dimensionales independientes entre sí, no facilita un criterio definido para seleccionar la forma de dichos parámetros más adecuada a cada problema concreto, ya sea en relación con la aplicación objeto de este trabajo o con cualquier otra.

Tomando nuevamente como ejemplo el punto 4, el uso del teorema arriba citado al ejecutar el paso B podría haber conducido a una expresión como la siguiente:

$$\frac{p}{de^5a^2} = H\left(\frac{t}{e}, \frac{ae^2}{v}, R\right) \quad (6.1)$$

En donde H es una función genérica de estructura desconocida.

Como es fácil ver, hay algunas diferencias significativas entre esta última expresión y la 4.1 a pesar de que ambas se han deducido a partir del teorema de Buckingham:

- La 4.1 combina los efectos de origen inercial y viscoso en el parámetro no dimensional situado a la izquierda de la misma, mientras que estos dos efectos aparecen claramente separados en la 6.1 (la densidad se incluye en un único parámetro no dimensional y la viscosidad en otro).
- La 4.1 incluye la velocidad de giro en un solo parámetro no dimensional, mientras que en la 6.1 aparece en dos de ellos.

En este caso concreto, ambas expresiones permiten llegar al resultado final (expresión 4.3) de una forma muy parecida, pero en otros casos, las diferencias existentes entre los parámetros no dimensionales seleccionados podrían dar lugar a niveles de dificultad muy distintos durante la ejecución del paso C, y en este sentido, el teorema de Buckingham no permite establecer directriz alguna.

7. Conclusiones y comentarios finales

En el ámbito de la ingeniería, el análisis dimensional constituye una alternativa muy eficiente para establecer expresiones de carácter global aplicables a problemas sobre los que no se dispone de modelo matemático detallado.

A cambio de lo anterior, dicha alternativa exige unos niveles de conocimiento y experiencia considerables por parte del personal que vaya a utilizarla, y en este sentido hay varios aspectos que dependerán inevitablemente de la habilidad del usuario:

- Identificación de las variables con una contribución relevante en el fenómeno bajo estudio.
- Selección del conjunto de parámetros no dimensionales más adecuado a las peculiaridades del problema a resolver.
- Establecimiento de una relación simple (dependiente de un número finito de constantes) entre los parámetros arriba citados.

Aunque no hay nada que garantice el éxito al ejecutar estas tres actividades (nótese que coinciden exactamente con los tres pasos del esquema procedimental indicado en la introducción), en la mayoría de los casos bastará con que las suposiciones efectuadas hayan sido razonables (no hace falta que sean correctas del todo) para poder considerar el resultado obtenido al menos como una primera aproximación de tipo orientativo.

8. Referencias bibliográficas

[1] **White F.M.**, 1979, *Mecánica de fluidos*, Editorial McGraw-Hill.

[2] **Ben-Dor G., Dubinsky A., Elperin T.**, 2013, Analytical engineering models of high speed normal impact by hard projectiles on metal shields, *Central European Journal of Engineering*.

[3] **Kirtley J.**, 2003, *Electric machines*, Class notes 1: electromagnetic forces, MIT Department of Electrical Engineering and Computer Science.

APROXIMACIÓN A LA CARACTERIZACIÓN DE LOS BUQUES DE GUERRA A PARTIR DE SU DISEÑO Y EMPLEO OPERACIONAL EN LA ARMADA NACIONAL

APPROACH TO THE CHARACTERIZATION OF WAR VESSELS FROM THEIR DESIGN AND OPERATIONAL EMPLOYMENT IN THE COLOMBIAN NAVY

*El principio de la sabiduría está en la definición de términos
Sócrates*

CFLPRO D. JOSÉ DAVID PEROZA DAZA

Máster en Ingeniería Naval Militar, Dirección de Programas Estratégicos, Bogotá
jose.peroza@armada.mil.co

CNESP D. CAMILO ERNESTO SEGOVIA FORERO

Máster en Ingeniería Electrónica, Dirección de Programas Estratégicos, Bogotá
camilo.segovia@armada.mil.co

Resumen

Referirse a un buque de guerra, nos hace inmediatamente imaginar un buque con cañones, misiles, sensores, antenas y de gran tamaño, pero ¿son estos atributos los que permiten caracterizar adecuadamente a un buque como de guerra?

La Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CONVEMAR), define internacionalmente lo que es un buque de guerra, pero en esa definición tan amplia, caben un sin número de plataformas donde no todos están diseñadas para emplearse dentro de escenarios de alta intensidad bélica o para el combate naval. Por consiguiente, es necesario definir adecuadamente los tipos de buques que pueden ejecutar las operaciones típicas de una marina de guerra, diferenciando estas operaciones entre las de guerra y las de no guerra, de tal manera que permita clasificar los buques de mejor manera.

La capacidad de supervivencia del buque en los distintos escenarios navales, permitirá especificar qué tipo de plataforma y con qué propósito fue conceptualizado, definido, diseñado y construido. Esta capacidad, se convierte en un criterio diferenciador para los buques militares con que cuenta una marina de guerra, siendo este uno de los criterios que mayor impacto generan en el tamaño y costo del buque de guerra, por lo que su definición es un factor clave para alcanzar la capacidad operacional requerida, garantizando el cumplimiento de la misión y la vida de la tripulación.

El presente documento permitirá establecer una aproximación hacia una diferenciación más detallada entre los disímiles buques que abarca la definición de la CONVEMAR, considerando aspectos como las operaciones navales, la capacidad de supervivencia, y la complejidad de los sistemas de armas, con el propósito de caracterizar adecuadamente los actuales y futuros buques de la Armada Nacional.

Abstract

El concepto operacional de los buques militares determina sus requerimientos de desempeño y sus restricciones de diseño, esto implica que desde su fase de conceptualización se debe tener claridad del tipo de operaciones, misiones, tareas, amenazas y escenarios navales en los cuales será empleado. Este concepto operacional determina la complejidad de un buque militar, y es esta complejidad asociada a la plataforma y a su sistema de armas la que permite caracterizar los diferentes tipos de buques militares. En este artículo se definen y presentan criterios diferenciadores que permiten caracterizar los buques de guerra y el impacto de la complejidad del buque (plataforma/sistema de armas) de acuerdo a su empleo operacional en el tamaño y costo del buque.

PALABRAS CLAVES:

Supervivencia, Escenarios navales, Sistemas de Armas, Buque de Guerra, Concepto Operacional, Operaciones Navales.

The operational concept of the military ships determines their performance requirements and their design restrictions; this implies that from the conceptualization stage, the type of operations, missions, tasks, threats and naval scenarios in which it will be used must be clear. This operational concept determines the complexity of a military vessel, and it is this complexity associated with the platform and its weapons systems that allows characterizing the different types of military vessels. This article defines and presents differentiating criteria that allow the characterization of warships and the impact of the complexity of the ship (platform / weapons system) according to its operational use in the size and cost of the vessel.

KEY WORDS:

Survival, Naval Scenarios, Weapons Systems, Warship, Operational Concept, Naval Operations.

1. Introducción

La mayéutica, método dialectico de Sócrates, se basa en la discusión racional y la búsqueda de definiciones universales para abordar un fenómeno, un objeto o un sujeto, para tener la posibilidad de llegar a conceptos precisos, fijos y válidos para todos (Mayor, 2001). En el presente trabajo se proponen distintas aproximaciones y diferentes conceptos sobre la definición de un buque de guerra, considerando criterios diferenciadores que permiten categorizarlos diferentes tipos de buques militares.

Al referirse al concepto de un buque de guerra, lo primero que llega al imaginario colectivo es la definición internacional de las Naciones Unidas, consignada en la Convención sobre el Derecho del Mar, la cual indica:

(CONVEMAR)- Artículo 29 - Definición de buques de guerra: Para los efectos de esta Convención, se entiende por «buques de guerra» todo buque perteneciente a las fuerzas armadas de un Estado que lleve los signos exteriores distintivos de los buques de guerra de su nacionalidad, que se encuentre bajo el mando de un oficial debidamente designado por el gobierno de ese Estado cuyo nombre aparezca en el correspondiente escalafón de oficiales o su equivalente, y cuya dotación esté sometida a la disciplina de las fuerzas armadas regulares. (*Organización de las Naciones Unidas, 1982, págs. 40-41*)

Esta definición, aceptada por todos los países que suscribieron la CONVEMAR, e incluso por países que no la han suscrito (como en el caso de Colombia), obedece al derecho consuetudinario y constituye una base jurídica no vinculante para precisar lo que es un buque de guerra. Por otro lado, el artículo 96 de la CONVEMAR,

describe los buques de Estado, los cuales se definen como aquellos buques pertenecientes a un Estado o explotados por él y utilizados únicamente para un servicio oficial no comercial. (Organización de las Naciones Unidas, 1982, pág. 71)

La Armada Nacional acepta e incorpora la definición establecida en la CONVEMAR, en la Doctrina de Material Naval, Tomo II – Clasificación, numeral 1.5 Definiciones, expone los conceptos de unidad a flote, unidades aéreas y buques de guerra. A su vez, este mismo documento en el numeral 1.6 Clasificación de las unidades, dispone los buques según su función y labor específica de la siguiente manera (Armada Nacional, 2014, pág. 14):

- Unidades de Mar de Combate: Son las Unidades a flote destinadas para el combate en el mar y cuya característica principal es la dotación de armamento mayor, para el desempeño de misiones en la guerra de superficie, antiaérea y antisubmarina.
- Unidades de Mar de Guardacostas: Son las Unidades a flote destinadas para el cumplimiento de funciones de vigilancia y control marítimo al servicio del Cuerpo de Guardacostas, de acuerdo con lo establecido en el Decreto 1874 del 02 de agosto de 1979. Estas Unidades carecen de armamento mayor para la guerra naval. Su dotación de armamento está orientada a la prevención y restricción de actividades ilícitas en las aguas marítimas jurisdiccionales, especialmente en las aguas interiores, mar territorial y zona contigua.
- Unidades de Mar Logísticas: Son las Unidades a flote destinadas a prestar apoyo logístico a las Unidades de mar de combate o cualquier otra Unidad. Pueden contar o no con armamento de dotación para su defensa. Pertenecen a esta clasificación el buque escuela, los buques logísticos, los buques oceanográficos, hidrográficos y balizadores, los remolcadores, los diques flotantes, las embarcaciones de transporte general.

Si se relaciona la primera definición de buque de guerra — es decir la definición de la CONVEMAR — con la clasificación que establece la Doctrina de Material Naval, se observa que las unidades de mar (combate, guardacostas y logísticas), son buques de guerra; sin embargo, no todo buque de mar está diseñado para desempeñarse en escenarios de combate o de «guerra naval».

Por lo anterior, en el presente documento se proponen criterios diferenciadores y parámetros de desempeño, que permitirán establecer definiciones más precisas para la clasificación de las unidades de mar anteriormente expuestas especialmente las referidas a las unidades de combate.

2. Criterios diferenciadores

Se presentan tres criterios diferenciadores, que ofrecen una interpretación más exacta del buque de guerra que la aportada por la CONVEMAR, visto desde una perspectiva misional, de la configuración de la plataforma y de los sistemas de armas, y finalmente por su tamaño, complejidad y costo. Estos criterios permitirán, desarrollar definiciones más específicas para los diferentes tipos de buques.

2.1 Criterio misional

La primera diferenciación, se sustenta en las disimiles capacidades que los buques deben tener para el desarrollo de las diferentes misiones y operaciones. La Directiva Permanente del Comando General N.º. 003 de 2009, Difusión y Aplicación de las Tareas y Roles de las Fuerzas Militares (Reservada), establece las operaciones tipo de la Armada Nacional, las cuales están agrupadas en operaciones de guerra y operaciones navales no relacionadas con la guerra. Con base en esta directiva y buscando integrarla con la Estrategia Pentagonal de la Armada Nacional y realizando una analogía coherente con la doctrina NATO (*North Atlantic Treaty Organization*), se realizará una aproximación a las operaciones navales que cada buque desarrolla de acuerdo

con el concepto operacional para que cual fue diseñado, empleando como referencia el documento *WorkingPaper on Small Ship Design* (NATO Naval Group 6, 2004) (NATO Naval Group 6, 2004), para agrupar las operaciones tipo, tal como lo ilustra la siguiente figura:

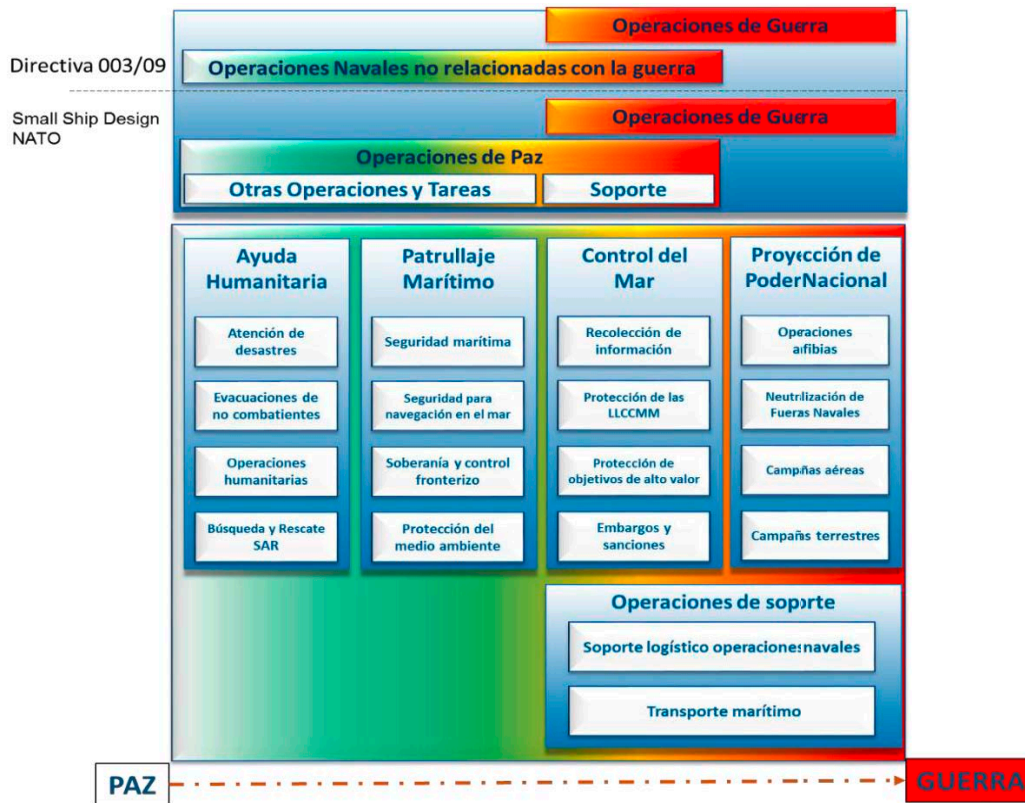


Figura nº. 1 Operaciones navales

Fuente: Elaboración propia a partir de la Directiva 003/09 CGFM y del document *WorkingPaper on Small Ship Design* NATO 2004.

Esta clasificación de operaciones, permite agrupar los buques en tres categorías: la primera con capacidades para realizar operaciones de ayuda humanitaria, patrullaje marítimo y control del mar limitado (los cuales se asocian a los buques tipo OPV – *Offshore Patrol Vessel*, y tipo CPV – *Costal Patrol Vessel*), la segunda que contiene las anteriores e incluye las capacidades de ejecutar operaciones de control del mar y de proyección del poder nacional en su totalidad, en esta categoría se enmarcan los buques de combate o de guerra naval (generalmente asociados a los buques tipo fragata y a los submarinos en el contexto de la Marina colombiana), y un tercer tipo de buques con capacidad de operaciones de soporte para escenarios de operaciones de guerra (como lo son los buques multipropósito, buques de apoyo logístico o buques de asalto anfibia).

En cada modalidad de operación, están definidas las misiones que las unidades de mar deben desarrollar, y a partir de esas misiones se logra precisar las capacidades y los requerimientos operativos que influyen en el diseño e impactan en la configuración de la plataforma y del sistema de armas. Debido a esta diferenciación de operaciones, misiones y capacidades que existen los distintos tipos, series y clases de buques dentro de las marinas de guerra.

Estas capacidades deben ser definidas al detalle en las primeras fases de las metodologías para la adquisición de un sistema militar. Para los países miembros de la NATO (*North Atlantic Treaty Organization*), esta metodología es denominada *Phased Armaments Programming System* (PAPS). Para el caso de la Marina de guerra colombiana, mediante la Circular No 204 SECAR del 01 de octubre de 2014, se ordena la implementación de

la metodología para el desarrollo de Programas para la Adquisición de Sistemas Militares Armada Nacional versión 1 – PRADMAR, la cual cuenta con cuatro fases establecidas para todo el ciclo de vida del sistema militar, de acuerdo con la siguiente gráfica:



Figura nº. 2 Fases metodología PRADMAR

Fuente: Gerencia Programa PES.

En la fase conceptual, se define el concepto operacional (ConOps), asociado a las misiones, escenarios y objetivos específicos; identificando la brecha de capacidad existente, la necesidad y la previabilidad operativa orientada a determinar capacidades operacionales requeridas (COR) en posibles soluciones (materiales o no materiales), para reducir la brecha. Posteriormente, en la fase de definición y decisión, se desarrolla y detalla cada uno de los objetivos anteriormente identificados, llevándolos a nivel de requisitos funcionales, donde aspectos como la ingeniería, la tecnología disponible, el costo, la disponibilidad de la industria, etc., permiten traducir esas necesidades operativas en sistemas, equipos y elementos que van a constituir el buque; y a través del análisis de alternativas (AoA) se evalúan y seleccionan las mejores propuestas en las dimensiones de desempeño, tiempo, costo y riesgo, facilitando el proceso de deliberación a los tomadores de decisiones para la adquisición.

En definitiva, la correcta definición del concepto operacional, la identificación de las misiones y el detalle de las capacidades operacionales requeridas, permitirá conceptualizar el tipo de buque más adecuado para el desarrollo de las operaciones, y por ende ofrece una aproximación a la clase de plataforma y de sistema de armas más conveniente, dependiendo de la complejidad del escenario donde se va a desempeñar.

Existen diferentes propuestas para describir los escenarios de conflicto naval, sin embargo para el presente documento se emplearán como referencia los definidos por la Marina Española en el documento Concepto de Operaciones Navales 2015. (Armada Española, 2015).

«Escenarios de alta intensidad

Son aquellos donde la oposición militar está organizada, con capacidades complementarias y coordinadas, adecuadas al entorno, y que actúan de acuerdo a unos principios de eficacia. En los escenarios de alta intensidad predominan las operaciones de combate convencional, aunque pueden combinarse con acciones de tipo asimétrico.

En las operaciones de escenarios de alta intensidad, la Fuerza Naval debe estar preparada para llevar a cabo acciones ofensivas y defensivas para derrotar o imponerse al adversario en un combate convencional.

Las amenazas principales para la Fuerza Naval en este tipo de escenario son los submarinos y las unidades de superficie, las aéreas y las terrestres con alta capacidad ofensiva, y en ambientes

electrónicamente saturados. Las unidades del adversario podrán hacer uso de sistemas ofensivos de altas prestaciones como los misiles anti-buque sofisticados. En estos escenarios el potencial adversario podrá llegar a emplear armas químicas, biológicas o radiológicas proyectadas mediante el empleo de misiles balísticos de largo o medio alcance.

Escenarios de media intensidad

Existe oposición de tipo militar, pero no está eficazmente organizada y coordinada. Puede producirse una alternancia entre operaciones convencionales limitadas y no convencionales, con predominio normalmente de estas últimas.

Las amenazas más usuales en este tipo de escenario para las unidades de la Fuerza Naval son las unidades de superficie, las aéreas y las terrestres con capacidad ofensiva limitada. Además el adversario podrá usar misiles o cohetes portátiles desplegados tanto en tierra como en embarcaciones rápidas, medios ligeros de superficie o aéreos tripulados o no tripulados, los buzos, las minas, los artefactos explosivos de circunstancia y los francotiradores. En estos escenarios, el potencial adversario también podría llegar a emplear armas químicas.

Escenarios de baja intensidad

No existe una oposición militar organizada, pero sí puede desarrollarse violencia esporádica por parte de grupos armados o terroristas, y se realizan principalmente operaciones para garantizar la libertad de acción propia frente a amenazas no convencionales»

2.2 Criterio Técnico de la Plataforma

Desde un enfoque sistémico, un buque es un sistema de sistemas, que integra principalmente un sistema de plataforma (casco, propulsión, generación, sistemas auxiliares, habitabilidad), y un sistema de armas (comando y control, navegación, comunicaciones y armamento). La plataforma se compone de un conjunto de sistemas integrados entre sí, con unas particularidades de diseño que permiten la seguridad y el empleo óptimo del sistema de armas para obtener una ventaja operacional sobre sus potenciales adversarios. (Boisier, 1981).

Los requerimientos de las marinas de guerra alrededor de los sistemas de armas, por lo general están asociados a restricciones de costos de adquisición y de desempeño operacional, orientados a tener la efectividad adecuada para atender los diferentes conflictos, obedeciendo a tecnologías de última generación, conformadas por sistemas eficientes y precisos, automatizados, con capacidades multimisión, etc.

Por lo tanto, los dos componentes principales del buque de guerra son: su capacidad para el combate (sistema de armas), y en la capacidad potencial de la plataforma de soportar y enfrentar las diferentes amenazas en los diferentes escenarios en que se desarrolla las operaciones, a esta capacidad se le conoce como supervivencia. (Kok, 2012).

Gracias a la evolución tecnológica en arquitectura y en ingeniería naval, las oficinas de diseño y los astilleros militares del mundo, se han logrado obtener soluciones de plataformas que se pueden desempeñar en escenarios bélicos de alta intensidad, basados en diseños y formas de buques de menor complejidad (menor capacidad de supervivencia), que debido a los atributos de modularidad y flexibilidad pueden cumplir, en gran parte, con los requerimientos técnicos del sistema de armas, de velocidad, de márgenes de crecimiento, entre otros; sin embargo, muchas de estas plataformas mantienen su *ethos* y sus parámetros de desempeño asociado a escenarios de baja y media intensidad, es decir con requerimientos de supervivencia menos exigentes.

El concepto de supervivencia, está relacionado con la capacidad de un buque para garantizar: la protección adecuada a la tripulación evitando lesiones graves o la muerte, y el funcionamiento de los sistemas críticos, de tal manera que permita mantenerlas condiciones operacionales para llevar a cabo su tarea en un escenario de conflicto bélico. Esta capacidad es aplicable tanto en el combate, como en accidentes generados por el combate o en eventos no relacionados con el combate como incendios, colisiones, encallamiento, entre otros. (Department of the Navy, Office of the Chief of Naval Operations, 2017) (Department of the Navy, Office of the Chief of Naval Operations, 2017).

La supervivencia se encuentra integrada por tres componentes principales, la susceptibilidad, la vulnerabilidad y la recuperabilidad. A su vez, estos componentes se dividen en otros atributos que son diseñados e integrados dependiendo del tipo de operación, misiones a desarrollar y los requisitos operativos del tipo y clase de buque. Básicamente la estructura de la supervivencia para un buque es como a continuación se presenta:



Figura nº. 3 Componentes de la supervivencia de un buque

Fuente: Construcción propia a partir de:

Survability Policy and Standars for Surface Shipsand Craft of the U.S Navy

La susceptibilidad es la probabilidad de recibir un impacto en un escenario naval bélico. Esta probabilidad se establece en función de la detectabilidad (reducción de firmas), en la efectividad de los sistemas de autodefensa, y de la capacidad de la tripulación para evitar o repeler un ataque gracias a la combinación de la táctica y de la doctrina operacional. (Department of the Navy, Office of the Chief of Naval Operations, 2017) (Department of the Navy, Office of the Chief of Naval Operations, 2017).

Por otro lado, la vulnerabilidad es una medida de la capacidad de la estructura de la plataforma, los diferentes sistemas que componen el buque y de la tripulación, para resistir los efectos de un impacto inicial producido por las armas del enemigo o por posibles accidentes, de tal manera, que se proteja a la tripulación de lesiones graves o de muerte y que se permita seguir realizando las misiones de guerra asignadas; estas averías se pueden presentar por la acción de una amenaza convencional, una exposición NBQR (Nuclear, Biológico, Químico y Radiológica), un arma asimétrica o en eventos no relacionados con el combate como incendios, colisiones, encallamiento, etc. (Department of the Navy, Office of the Chief of Naval Operations, 2017) (Department of the Navy, Office of the Chief of Naval Operations, 2017).

Finalmente, la recuperabilidad es una medida de la capacidad de la plataforma, los diferentes sistemas y de la tripulación del buque, que a partir de los efectos de un impacto inicial (cualquiera que sea su origen), pueda tomar las medidas de emergencia y de control de averías, que prevean la pérdida o daño del buque, minimizando el efecto del impacto sobre las personas y restaurando o manteniendo los sistemas vitales del buque.

(Department of the Navy, Office of the Chief of Naval Operations, 2017) (Department of the Navy, Office of the Chief of Naval Operations, 2017).

La supervivencia del buque, obedece a la interacción del diseño y configuración de los conceptos anteriormente expuestos, donde la reducción o el aumento de sus componentes ofrecen un mejor comportamiento ante las amenazas en los escenarios identificados donde operará el buque.

En la figura N.º. 4 se expone una propuesta gráfica, de la evolución de una avería ante el impacto inicial a la plataforma de un buque militar, ya sea por acción de las armas del enemigo o por un accidente. Para establecer la condición final del buque, se utilizaron las tres condiciones finales posibles que el *Naval Ship Code*¹ determina para las diferentes amenazas (NATO, 2014, pág. 48): abandono, regreso a puerto y continuar combatiendo; así como el proceso de evolución de los elementos que integran la supervivencia de una plataforma con capacidad de combate. (Boulougouris & Papanikolaou, 2013).

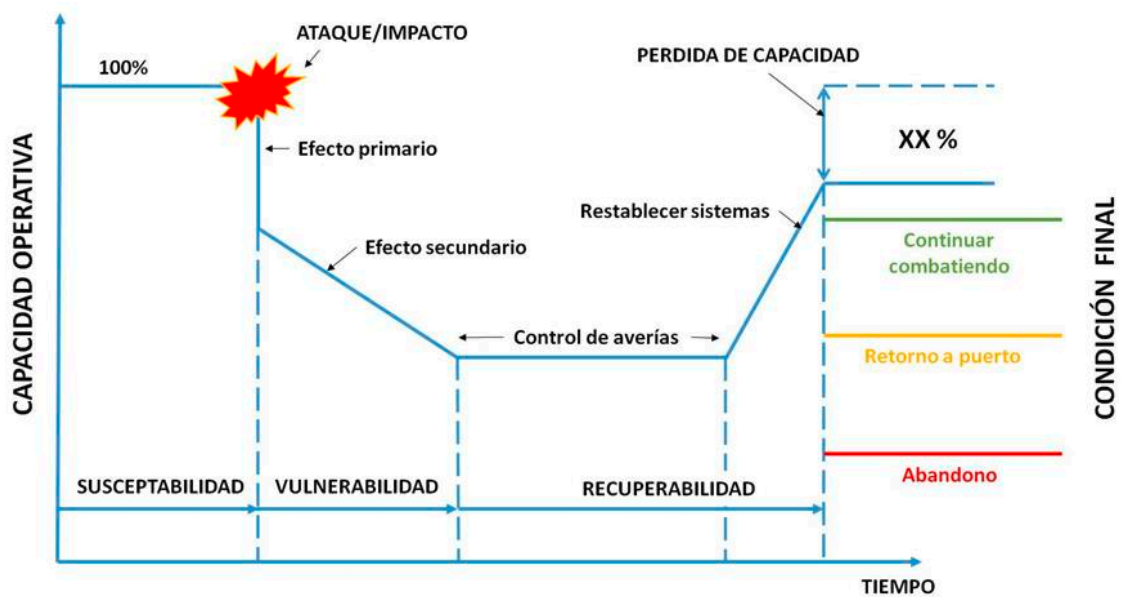


Figura n.º. 4 Evolución de los componentes de la supervivencia en el buque de combate
Fuente: Construcción propia a partir de: *Risk-based Design of Naval Combatants* y ANEP-77.

2.3 Criterio del Sistema de Armas

Como se había mencionado, el sistema de armas es un componente principal del buque de guerra, que le permite obtener una ventaja operacional sobre su potencial enemigo. Un sistemas de armas intercambian información entre diferentes subsistemas: los relacionados con la localización e identificación de blancos, denominados sensores; el subsistema de efectores que son las armas (cañones, misiles, torpedos, etc.); un subsistema de procesamiento, despliegue y gestión de la información normalmente conocido como el sistema de gestión de combate o CMS (*Combat Management System*); y la integración del subsistema de comunicaciones (Hall, s.f). En la siguiente gráfica de bloques se presenta los principales subsistemas.

¹*Naval Ship Code*: Documento publicado por NATO que incluye los códigos y guías de apoyo, con el objetivo de establecer los niveles mínimos de seguridad para los buques de las Armadas de Guerra. También es conocido como ANEP-77

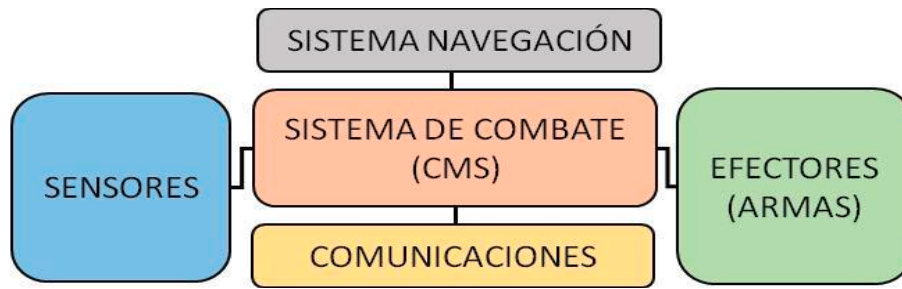


Figura nº. 5 Diagrama de bloques de un sistema de armas

Fuente: Gerencia Programa Plataforma Estratégica de Superficie

La complejidad del sistema de armas está diseñada en función del concepto operacional que a su vez determina el tipo de operaciones a desarrollar y a las probables amenazas que va a enfrentar en los diferentes escenarios navales, esta aseveración es contrastable con la evolución del concepto establecido por Ken Booth sobre los roles principales de las marinas modernas, donde el incremento del uso de la fuerza aumenta a medida que los tipos de operaciones navales elevan su complejidad como se presenta en la figura nº. 6. (Jackson, 2010).

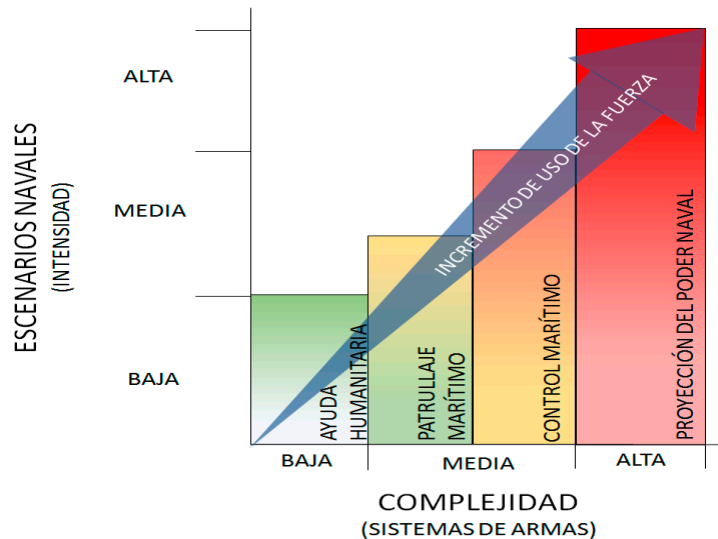


Figura nº 6. Operaciones navales vs. Incremento del uso de la fuerza

Fuente: Elaboración propia a partir del documento

Working Paper on Small Ship Design y Keystone Doctrine Development in Five Commonwealth Navies

Por lo tanto, cada tipo de buque tendrá un sistema de armas acorde a la complejidad de la operación y del escenario naval en que se desempeñe, determinando el conjunto de efectores, del sistema de combate, las comunicaciones y los sensores, de tal manera que sean consistentes a los parámetros de desempeño establecidos.

Los sistemas de armas, a su vez dependen a los atributos que cada marina de guerra establezca, que por lo general, obedecen a requerimientos que permitan la flexibilidad, escalabilidad, mantenimiento, calidad, entre otros. Por lo que el tipo de operación, el escenario naval, junto con los atributos del sistema establecido, permiten definir el sistema de armas con el que cada tipo de buque debe contar para desarrollar las operaciones.

Una propuesta para clasificar el sistema de armas de los buques de guerra, a partir de las operaciones y de los escenarios navales, se presenta a continuación:

- **Baja complejidad:** diseñado para buques que desarrollen operaciones relacionadas con ayuda humanitaria y seguridad marítima en escenarios de baja intensidad, por lo que no cuenta con todos los componentes que conforman un sistemas de armas, sino que su capacidad se centra en los efectores (armas), los cuales pueden ser operados de manera local o remota y su desempeño obedece al entrenamiento y habilidad del operario.
- **Media complejidad:** diseñado para buques que se desempeñen entre operaciones de ayuda humanitaria hasta operaciones de control del mar en escenarios de baja y media intensidad. Estos sistemas se caracterizan por la interacción de los subsistemas de efectores, sensores y un sistema de control de tiro, que procesa los datos obtenidos facilitando la toma de decisiones, disminuyendo tiempos de detección y enganche de blancos, incrementando la precisión, entre otras prestaciones.

Ofrece al buque las capacidades operacionales requeridas para realizar presencia naval, apoyar e influir en operaciones de disuasión o contención de amenazas de superficie, aéreas y submarinas:

- **Alta complejidad:** diseñado para buques que se desempeñan en todo el espectro de las operaciones navales, en escenarios de baja, media y alta intensidad. Este sistema de armas cuenta con la interacción de todos los subsistemas mencionados anteriormente y ofrece la capacidad de: destruir y neutralizar amenazas de superficie, aéreas, submarinas y en el espectro electromagnético; eliminar objetivos terrestres, implementar la doctrina táctica de la respectiva marina de guerra; e intercambiar el panorama táctico con otras plataformas, entre otras.

Este sistema de armas de alta complejidad, brinda al buque las capacidades operacionales requeridas para la búsqueda, detección y seguimiento de blancos a través del subsistema de sensores y de la información recibida del sistema de mando y control propio del buque, así como de otras unidades aéreas, de superficie o submarinas. Facilita la toma de decisiones, ya que cuenta con la capacidad de evaluación de amenazas, la función de asignación de las armas, función de planificación del enfrentamiento de la amenaza, enfrentamiento de blancos de guerra antiaérea, guerra de superficie, guerra antisubmarina y de guerra electrónica.

En la siguiente figura se presenta una comparación de diferentes tipos de buques, entre los escenarios de operación naval y la complejidad del sistema de armas, a partir de las definiciones anteriormente expuestas.

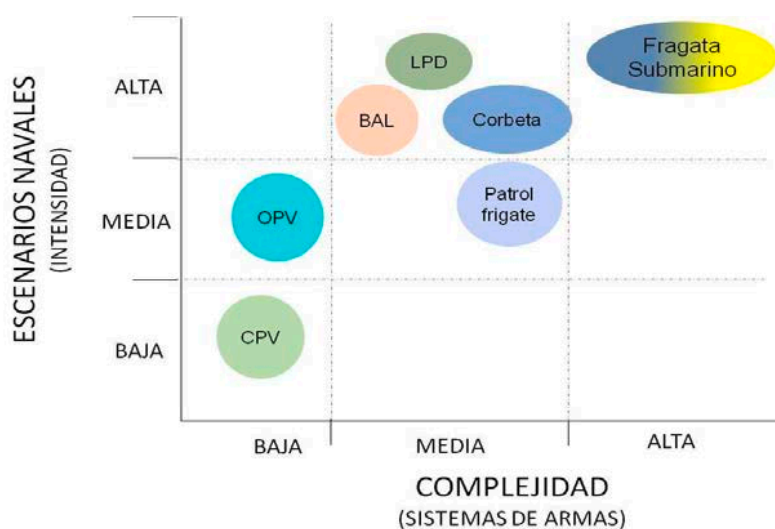


Figura nº. 7 Comparación entre los escenarios navales y la complejidad asociada al sistema de armas

Fuente: Elaboración propia

2.4 Criterio en tamaño, complejidad y costo

Otro criterio para determinar las disimilitudes de los buques, puede ser el incremento del tamaño de la plataforma y la complejidad asociada en su diseño. En la siguiente gráfica se puede evidenciar una propuesta de parámetros de diferenciación entre algunos tipos de buques, comparando en la abscisa la complejidad del diseño (en sistema de armas y estándares de construcción), y en la ordenada el tamaño de buque (orientado a la plataforma):

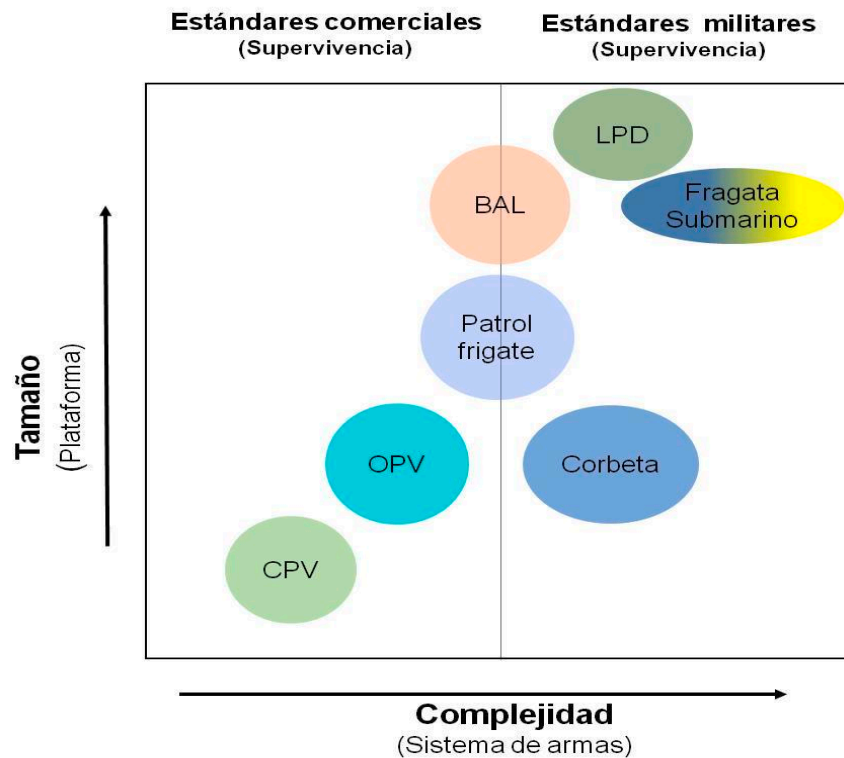


Figura nº. 8 Comparación entre complejidad (sistema de armas y estándares) y tamaño del buque

Fuente: Elaboración propia a partir de:

Designing for the Gap: The space between the OPV and the Frigate.

La figura nº. 8, permite evidenciar que los estándares de supervivencia de una plataforma están estrechamente relacionada al tipo de operación y al escenario bélico donde se desempeña, impactando el tamaño del buque; por otro lado el aumento de la capacidad del sistema de armas repercute directamente en la complejidad del buque y plataforma, las que influyen en el costo del buque.

Para explicar este último aspecto, en la figura nº. 9 se presentan las variaciones de costo que se generan por la complejidad del sistema de armas o por el aumento del tamaño, donde la diagonal que cruza desde el origen hacia la esquina superior derecha (color rojo), representa un incremento en el costo de los buques influenciado por el tipo de estándar a utilizar en el cumplimiento de normas de supervivencia, tamaño y complejidad. Por otra parte, la diagonal que cruza de derecha a izquierda, (color azul) corresponde a una línea común de costos asociada al aumento de las capacidades finales (tamaño, capacidad de combate, supervivencia).

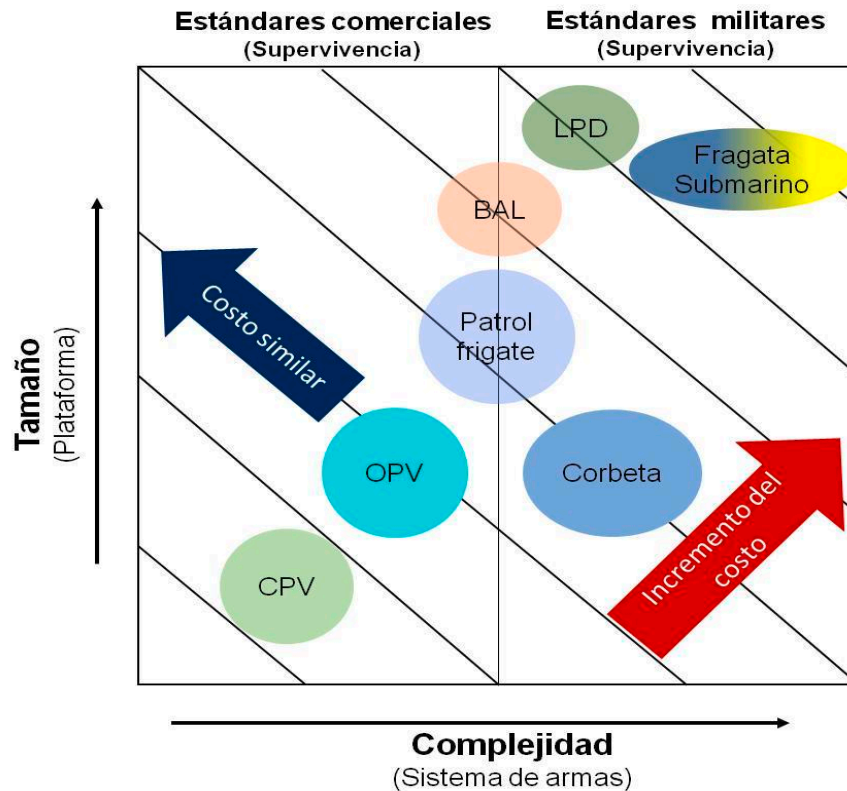


Figura nº. 9 Desempeño relativo por tipo de buque: complejidad vs tamaño vs costo

Fuente: Elaboración propia a partir de:

Designing for the Gap: The space between the OPV and the Frigate.

3. Definición de los tipos de buque

Continuando con el propósito de definir y caracterizar adecuadamente los tipos de buques, a partir de las tres categorías identificadas en el criterio diferenciador misional, el criterio técnico relacionado con la supervivencia de la plataforma y el criterio en de los sistemas de armas, a continuación se proponen las definiciones conceptuales de los principales tipos de buques de la Marina de guerra colombiana, de tal manera que se obtenga una mayor precisión en su descripción de las características propias de cada uno de ellos:

- **Buques patrulleros de costa (*Coastal Patrol Vessel – CPV*):**

Buque diseñado para cumplir misiones de ayuda humanitaria y patrullaje marítimo, realizando misiones de patrullaje, búsqueda y rescate, control fronterizo, seguridad marítima, lucha contra el narcotráfico, hacer cumplir las normas de OMI en el mar territorial, protección del medio ambiente, protección de flotas pesqueras, protección de puertos y demás misiones típicas de guardacostas.

La plataforma de este buque obedece a la aplicación de estándares comerciales de casas clasificadoras, relacionados con la seguridad en el mar, de la tripulación y del buque para escenarios de baja intensidad. El diseño de la plataforma permite la operación en aguas cercanas a la costa y con capacidad de lanzar botes de reacción.

Cuentan con las armas necesarias para ofrecer una capacidad de defensa acorde con las amenazas de baja intensidad, tales como piratería, grupos armados terroristas o amenazas no convencionales. (National Defense Research Institute, 2008).

- **Buques patrulleros oceánicos (*Offshore Patrol Vessel - OPV*):**

Plataforma diseñada para cumplir misiones de seguridad marítima es decir, abarca una variedad de funciones, incluida la lucha contra el tráfico ilegal de drogas, la delincuencia transnacional, control del medio ambiente, evacuación de personal, apoyo humanitario y ayuda en casos de desastres naturales, la protección del comercio marítimo, la libertad de navegación, así como apoyar operaciones para conservar la integridad de los territorios marítimos, básicamente es el medio adecuado para ejecutar misiones de guardacostas, pero puede desarrollar misiones de control del mar.

Incorporan armas, sensores y sistemas de control de tiro con las prestaciones necesarias para la defensa y el ataque de amenazas propias de escenarios de baja y media intensidad.

Cuenta con requisitos de supervivencia basados en la aplicación de normas y reglas comerciales de casas clasificadoras, de tal manera que permita garantizar la seguridad de la tripulación y del buque en escenarios con amenazas de baja y media intensidad. (Kimber A. C., 2015).

- **Patrulleros con sistema de armas (*Patrol frigate*):**

Plataforma diseñada para efectuar operaciones en escenarios de baja y media intensidad, para el desarrollo de operaciones de control del mar, seguridad marítima y operaciones de ayuda humanitaria.

Cuenta con un sistema de armas con las prestaciones coherentes para apoyar e influir en operaciones regionales de disuasión o de contención, el cual le permite defenderse y atacar amenazas aéreas, de superficie, submarinas y electrónicas.

La plataforma cuenta con un nivel de supervivencia adecuado para los escenarios propuestos, basada en reglas comerciales de las casas clasificadoras que homologan las especificaciones militares, sin cumplir toda su rigurosidad, por lo que no se considera un buque de guerra. Esta diferencia ocasiona que el costo de adquisición sea menor al de un buque de guerra. (BMT Defense Services, 2018).

- **Corbetas (*Corvette*):**

Buque diseñado para efectuar presencia regional y operaciones de guerra en escenarios de baja y mediana intensidad, para desarrollar operaciones de ayuda humanitaria hasta control del mar; puede ejecutar misiones de guerra antisubmarina, antiperficie, antiaéreo y de fuego naval de apoyo, pero necesita del apoyo de otro tipo de unidades para su defensa.

Cuenta con un sistema de armas que garantiza una presencia militar a través de los suficientes sensores y armamento para defenderse y atacar objetivos aéreos o de superficie, así como con la capacidad de apoyar e influir en operaciones regionales de disuasión y contención de una amenaza.

Debido al tamaño compacto de la plataforma, tiene limitadas posibilidades de adaptabilidad² (márgenes de crecimiento y de modularidad), cuenta con un nivel de supervivencia de acuerdo con normas militares, pero tiene limitaciones en protección balística y en otros aspectos de vulnerabilidad, principalmente debido a sus restricciones de dimensión. (Andrew & Andrew, 2012).

- **Fragata (*Frigate*):**

Es un buque diseñado para lograr el equilibrio óptimo entre capacidad de combate y supervivencia, con el fin de desarrollar operaciones de guerra en los diferentes escenarios de amenazas, sin que necesite del apoyo de otras unidades para garantizar su defensa. Ofrece la capacidad de interoperar en grupos de tarea, para la ejecución de misiones que van desde proporcionar la fuerza ofensiva y defensiva de combate, hasta realizar tareas de seguridad marítima y de apoyo humanitario.

El sistema de armas tiene las prestaciones requeridas para permitir el ataque, el enfrentamiento y la defensa de amenazas aéreas, de superficie, submarina y electrónica, en escenarios de alta, media y baja intensidad a nivel mundial, manteniendo la condición final para la que fue diseñada.

La flexibilidad y modularidad que contiene la plataforma ofrece la oportunidad de incorporar sistemas futuros durante su vida útil, con el propósito de añadir nuevas capacidades o incrementar las existentes. Cuenta con un nivel de supervivencia de acuerdo a las normas militares para escenarios de alta intensidad. (BMT Defense Services, 2018).

- **Submarino Oceánico:**

Es un buque diseñado para desarrollar operaciones de disuasión y defensa bajo el agua, con gran capacidad ofensiva para desempeñarse en misiones desde ayuda humanitaria hasta operaciones de proyección del poder naval.

El sistema de armas le ofrece un balance óptimo para realizar el ataque, enfrentamiento y defensa de amenazas submarinas y de superficie, en escenarios de baja, media y alta intensidad a nivel mundial.

La plataforma tiene un alto nivel de supervivencia, con base en normas y estándares militares, de tal manera que le garantice su ventaja de operar de manera versátil y discreta, permitiendo el desarrollo de operaciones de ataque a blancos terrestres, de superficie y submarinos, infiltración de grupos de operaciones especiales, recolección de inteligencia y de reconocimiento de la fuerza naval adversaria, entre otras. (Lacroix, Button, Johnson, Chiesa, & Wise, 2002).

- **Buque de apoyo logístico (BAL):**

Buques diseñados para realizar principalmente misiones de soporte y apoyo logístico a las unidades que se desempeñen en operaciones navales de guerra y no relacionadas con la guerra, tanto de superficie como submarinas. Pueden desarrollar misiones secundarias de patrullaje marítimo y control

² Adaptabilidad: facultad del buque para modificar las capacidades para las que fue conceptualizado y construido. Esto se logra a través de la modularidad: que es lo que permite a un buque incorporar capacidades para distintas misiones a partir de unas interfaces definidas y dentro de unos límites de espacio definidos. La flexibilidad, se refiere a los márgenes de crecimiento o de expansión que generan espacio adicional para aumentar capacidades como potencia, enfriamiento y otros servicios del buque. (Schank, y otros, 2016)

del mar de manera limitada, así mismo pueden fortalecer la presencia y liderazgo, en escenarios internacionales a través de la ejecución de operaciones de asistencia y ayuda humanitaria.

Es un buque que se desempeña en escenarios de alta intensidad, con requisitos de supervivencia basados en estándares militares, sin embargo para algunos sistemas puede aplicarse normas comerciales de casas clasificadoras homólogas a las militares. Cuenta con un sistema de armas con requisitos de alta auto defensa (susceptibilidad) y con posibilidades de atacar amenazas de superficie y aéreas. (Kimber & Magne, 2006).

- **Buque de Asalto Anfibio (*Landing Platform Dock – LPD*):**

Buques diseñados para realizar operaciones de proyección del poder naval principalmente, aunque puede realizar misiones de ayuda humanitaria y de control del mar. Puede ser empleado como centro de comando y control, como parte de una fuerza de tarea naval o como unidad independiente. Tiene capacidad de transportar y ofrecer soporte logístico a lanchas de desembarco anfibio, helicópteros, vehículos y tropas de desembarco.

La plataforma está diseñada para desempeñarse en escenarios de alta intensidad, cumpliendo requisitos y estándares militares de supervivencia. Cuenta con un sistema de armas principalmente con capacidades de autodefensa de amenazas aéreas y de superficie, y puede atacar diferentes amenazas presentes en un escenario de alta intensidad. (Bureau Veritas, 2017) (Bureau Veritas, 2017) (Bureau Veritas, 2017)

En la siguiente tabla se presenta la comparación de los aspectos diferenciadores propuestos: operaciones, escenarios, supervivencia, complejidad, sistema de armas y complejidad, para facilitar la comparación de los buques anteriormente conceptuados.

Tabla N°. 1 Aspectos diferenciadores de los buques de guerra

BUQUE TIPO	MISIONAL (OPERACIONESNAVALES)				ESCENARIOS DE CONFLICTO NAVAL			PLATAFORMA (ESTÁNDARES DE SUPERVIVENCIA)			SISTEMAS DE ARMAS			TAMAÑO, COMPLEJIDAD Y COSTO		
	Ayuda humanitaria	Patrullaje marítimo	Control del mar	Proyección de P.N	Baja	Media	Alta	Comerciales	Homologados	Militares	Defensa	Ataque	Enfrentamiento	Baja	Media	Alta
CPV	✓	✓			✓			✓			✓			✓		
OPV	✓	✓	⚠		✓	✓		✓			✓	✓			✓	
Patrol Frigate	✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓		✓	✓			✓	
Corbeta	✓	✓	✓	⚠	✓	✓	⚠			✓	✓	✓	⚠		✓	
Fragata	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓			✓
Submarino	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓			✓
BAL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	⚠			✓	
LHD	✓	⚠	✓	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓				✓

⚠ : Con limitaciones

Fuente: Elaboración propia Programa PES 2018

4. Conclusiones

Expuestos los diferentes criterios de diferenciación, se puede concluir que desde la etapa de conceptualización de un buque, se deben identificar los tipos de operaciones, misiones, tareas, amenazas y escenarios en los que operará, con el fin de establecer los parámetros operacionales del buque y los atributos de sistema óptimos, entre el sistema de armas y la plataforma incorporados en su diseño.

La clasificación de los buques de combate, no es exclusivamente en función del armamento que pueda llevar a bordo, el compromiso adecuado entre la plataforma (asociado a la capacidad de supervivencia), la complejidad del sistema de armas, los parámetros operacionales, los estándares de construcción, las restricciones de costos, entre otros, juegan un papel preponderante para la definición adecuada del tipo de buque que se decida adquirir.

Para un buque de combate, la capacidad de supervivencia ante las posibles amenazas que pueda enfrentar en el desarrollo de las operaciones, es el atributo principal para determinar si está o no diseñado para el combate o para el apoyo del combate. Por lo tanto se deberá definir y establecer los estándares constructivos a exigir para cada tipo de buque, con el fin de evitar sobredimensionar las especificaciones de desempeño y las restricciones al diseño, de las plataformas que sean conceptuadas para ejecutar operaciones en escenarios de baja intensidad; que no exonera la responsabilidad y la obligación de exigir los estándares militares para los buques que se desempeñen en operaciones con escenarios de alta intensidad. Hay que considerar que los requisitos del estándar de construcción impactan directamente en el costo final del buque.

Los buques cuentan con las capacidades operacionales específicas para desempeñarse en escenarios navales definidos, por lo que destinar un buque para ejecutar operaciones en escenarios de intensidad superior para la que fue diseñado, genera algunos riesgos que cada marina debe gestionar. Por ejemplo en los buques de bajo costo de adquisición, que incorporan sistemas de armas complejos, con una capacidad de supervivencia diseñada para escenarios de baja y media intensidad, se debe analizar la conveniencia y el riesgo de su empleo en escenarios de alta intensidad, así como lo describió el Almirante Sir George Zambellas, *former First Sea Lord and former Chief of Naval Staff of the Royal Navy*, en una entrevista realizada durante la feria *Defense and Security Equipment International Conference*, publicada por el portal *Defense & Aerospace Report*, relacionado con el lanzamiento del diseño de la futura fragata inglesa *Type 31*, en septiembre del año 2017:

“Me sorprendería mucho si pudieran crear una plataforma creíble y adecuada por 250 millones de libras. Espero que lo hagan, porque mucha gente lo comprará. Pero si esta se hunde, no estaremos en una posición política ni moralmente favorable”.

Trabajos citados

- Andrew, K., & Andrew, J. (2012). Balancing Survivability, operability and cost for a corvette design. *RINA: Affordable warship conference*, (pág. 7). Bath, UK.
- Armada Española. (2015). *Concepto de operacionales navales*. Obtenido de Anexo 3. Escenarios de actuación:
<<http://www.armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/conocenosajema/prefLang-es/05conceptooperaciones--08anexo03-es>>
- Armada Nacional. (2014). *Doctrina de Material Naval* (Primera ed., Vol. II). Bogotá.
- BMT Defense Services. (3 de 05 de 2018). *BMT Defense Services - Venator 110*. Obtenido de <<https://www.bmtdsl.co.uk/>>
- Boisier, H. D. (mayo-junio de 1981). Adquisición de buques de guerra. *Revista de Marina*, 98(742), 272-286.
- Boulougouris, E., & Papanikolaou, A. (2013). Risk-based design of naval combatants. *Ocean Engineering*, 49-61. Obtenido de <www.elsevier.com/locate/oceaneng>
- Bureau Veritas. (June de 2017). Rules for the classification of Naval Ships. *Part A - Classification and surveys*.
- Carrero, P. (s.f.). Los buques de desembarco. *Revista de Marina*, 447-452.
- Department of the Navy, Office of the Chief of Naval Operations. (2017). Survivability policy and standars for surface ships and craft of the U.S Navy.
- Hall, J. (s.f). Principles of Naval Weapons Systems.
- Jackson, A. P. (2010). *Keystone Doctrine Development in Five Commonwealth Navies: A Comparative Perspective*.
- Kimber, A. C. (2015). Designing for the Gap: The space between the OPV and the Frigate. *Ship Science & Technology*, 8(17), 19-29.
- Kimber, A., & Magne, A. (2006). *Future naval tankers - bridging the environmental gap - the cost effective solution*. BMT Defense Service Ltda.
- Kok, S. L. (septiembre de 2012). Naval Survivability and Susceptibility reduction study - surface ship. Monterrey, California, EE.UU: Naval Postgraduate School.
- Lacroix, F., Button, R. W., Johnson, S. E., Chiesa, J., & Wise, J. R. (2002). *A Concept of Operations for a new deep-diving submarine*. Santa Monica: RAND.
- Mayor, C. B. (2001). Sócrates y los socráticos menores. *Revista de la Facultad de Educación de Albacete*, 11-32.
- National Defense Research Institute. (2008). *Small ships in theater security cooperation*. Santa Monica: RAND Corporation.
- NATO. (2014). *Naval Ship Code* (F ed.). NATO Standardization Office.
- NATO Naval Group 6. (2004). *Working paper on Small Ship Design*.
- NATO STANDAR. (2014). *Naval Ship Code - ANEP-77* (F Versión 1 ed.).

- Organización de las Naciones Unidas. (1982). *Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar*. Montego Bay.
- Schank, J., Savitz, S., Munson, K., Perkinson, B., McGee, J., & Sollinger, J. M. (2016). *Designing Adaptable Ships*. Santa Monica, California, EE.UU: RAND Corporation.
- Vilchez, F. (2012). *Presentación proyecto buque de guerra, Supervivencia*. Madrid: Universidad Politecnica de Madrid.

EL CARAJO Y LA COFA

CC (CIA) D. RAÚL VILLA CARO

Ingeniero Naval y Oceánico / Capitán de la Marina Mercante

Doctor por la Universidad de A Coruña

Jefe de Ingeniería de Plataforma de ICOFER

1. Introducción

Hace un par de años, un amigo y compañero de la Universidad de la Coruña me suministró una serie de ideas sobre las que poder escribir en un futuro inmediato. Entre ellas se encontraba una que enseguida captó mi atención. Evidentemente se trataba de una relacionada con la que da título a este artículo.

Según gran parte de las definiciones que transitan por la red internauta, vía fuentes tipo «Wikipedia» y «Taranga», y aunque no están respaldadas por la Real Academia Española (RAE), se narra que en el pasado se denominaba «carajo» a una pequeña canastilla que se encontraba en lo alto del palo mayor de los buques antiguos. El «carajo», dada su peligrosa ubicación en la zona alta del mástil, era un lugar muy poco seguro ya que en él era donde más se notaban los violentos «pantocazos», y las grandes cabezadas y balances de los buques. Por ello, cuenta la leyenda, que cuando algún miembro de la dotación cometía alguna falta grave, era conducido al «carajo», como muestra de castigo; por lo que sería posible que de este hecho pudiera proceder el porqué de cuando queremos dejar de ver a una persona, usemos la expresión, «vete al carajo». Pero regresando al buque, una vez que el castigado marinero había dado cuenta del mismo en el «carajo», descendía de la plataforma, y en esos momentos solía estar tan mareado que era incapaz de realizar ningún trabajo. Y de ahí podría nacer el motivo por el que cual a veces se utiliza la expresión «no vales un carajo». Si bien es verdad que en España igual no podamos encontrar pruebas de que para ese castigo se utilizara la expresión del carajo, sí las encontramos por ejemplo en Argentina, donde a principio de los años cincuenta, durante el servicio militar obligatorio, los marineros que cometían faltas eran conducidos al carajo para otear el horizonte, sobre todo en tiempos de mala mar, cuando la visibilidad era peor y menor. En aquellos tiempos no existía sinónimo para esa palabra en Argentina, solo se hablaba del carajo. (Kepa, 2010)

Por lo tanto, si aceptamos la definición mencionada de carajo como verídica, a pesar de las reticencias de algunos estudiosos e historiadores, o incluso de la falta de defensa por parte de la RAE, podría quedar demostrado que la ubicación de la canastilla se encontraba en lo alto del palo mayor y bastante apartada del ángulo de visión de gran parte de la dotación. Y precisamente pudiera ser que este hecho tuviera relación con la razón por la cual cuando una persona se encuentra a una gran distancia de nuestra ubicación, usemos la expresión, «se encuentra más lejos que el carajo».

Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados, no sería de extrañar que nadie del personal de la tripulación tuviera interés en ir a «parar al carajo», por lo que, por analogía, cuando algo no nos interesa, siempre podremos decir, «me importa un carajo». Y por todo ello, cuando alguien nos «mande al carajo», lejos de enfadarnos, deberíamos reflexionar y pensar, «¡cuánta cultura naval tiene este individuo!».



Figura 1. Canastilla, cofa o carajo (Fuente propia)

Como ya he mencionado al principio del artículo, la RAE, entre sus diversas y numerosas acepciones conocidas del término, no recoge la de la canastilla. Por el contrario, entre las sí incluidas se podrían destacar aquellas que expresan situaciones de disgusto, rechazo, sorpresa o asombro, como por ejemplo la expresión de, «eso está más malo que el carajo». Curiosamente, en el lenguaje coloquial a veces utilizamos esta expresión para definir algo muy atractivo o agradable, como en el caso, «esto está más bueno que el carajo». Pero a veces, por el contrario, si queremos destacar la parte oscura de una persona, podremos decir, «ese es más bruto que el carajo». Pero de igual forma, cuando mostramos nuestra admiración por nuestro mito o mita, podremos expresar, «está más bueno o buena que el carajo». Incluso a veces, si la forma de ser de una persona nos causa admiración, podemos exclamar, «¡ese es un tipo del carajo!».

Hasta en el mundo de las finanzas y los negocios podemos recurrir a este término. Por ejemplo, podríamos llegar al punto de que si una inversión fuera mal, se podría expresar, «si esto sigue así, nos vamos al carajo», de igual forma que cuando encontramos a una persona que llevábamos mucho tiempo sin verla la decimos «¿dónde carajo te habías metido?».

Visto lo visto, nunca terminaremos de tener claro si la palabra en cuestión indica buenos o malos sentimientos. Incluso cuando acudimos a una fiesta y nos encontramos buen ambiente, solemos expresar, «carajo, que buen rollo», pero si por el contrario no nos divertimos, entonces decimos, «¡esto es más aburrido que el carajo!».

Y todo esto sin olvidar aquel famoso dicho que dice que «cuando el grajo vuela bajo, hace un frío del carajo». Y así podríamos seguramente rellenar páginas y páginas, escribiendo una y otra expresión en la cual vaya incluida la susodicha palabrita. Pero si abusáramos y abusáramos de ella, podría llegar un momento en que alguien nos dijera, «¿pero qué carajo ocurre aquí?».

Alejándonos de nuestro país, en Cuba y en otros muchos países hispanoamericanos, aparte de los ya mencionados, también se utiliza el término carajo con asiduidad. Y llegados a este punto hasta se podría pensar que la expresión gaditana de «carajote» estuviera relacionada con la vida náutica y con el «carajo». (Kepa, 2010)



Figura 2. Cofa de la ENM de Marín, Pontevedra (Fuente: www.armada.mde.es)

Como anécdota del término se podría destacar que hace tiempo, Xabier Arzalluz, calificó al entonces presidente Tarradellas de «ególatra del carajo de la vela». Y yo me pregunto, ¿a qué «vela» se referiría? Cambiando de ruedo, según una señora que telefoneó hace años a un programa radiofónico, vecina de Sant Cugat, el «carajo de la vela» era un término utilizado por pescadores gallegos para denominar al argonauta, un molusco cefalópodo que, cuando nada, se asemeja a una barquita, y que, en sentido despectivo, equivale a la expresión castellana de «tontorrón». (Sagarra, 1999)

Para ir finalizando con las acepciones coloquiales, me gustaría destacar otra de un marino mercante español. Según él, allá por los años sesenta, cuando surcaba mares y océanos, se denominaba «carajo a la vela» a la medusa conocida como la «carabela portuguesa», que abunda mucho en las aguas atlánticas desde Portugal a Irlanda. Este tipo de medusas son muy peligrosas, pican, incluso a veces con efectos mortales, y su forma de desplazarse sobre la superficie del agua, hinchándose de aire, hace que sean arrastradas por vientos y corrientes. (Villa Caro, 2015)



Figura 3. Carabela portuguesa (Fuente: www.medusas.org)

2. La RAE y el carajo

Centrándonos en los significados que nos muestra la RAE del carajo, en la lista aparecen otros diferentes a los indicados en este artículo, pero casi todos con connotaciones negativas o de rechazo. Solo quisiera destacar un significado de todos ellos, y que además es el primero de todos los de la lista. Curiosamente este significado se desmarca del resto, estando asociado al miembro viril masculino.

Para dar luz a la opinión de la RAE al respecto, debo agradecer a «JonKepa» y a su blog de enseñanzas náuticas, por haberme introducido en algunas de las acepciones relatadas en este artículo, que por otro lado abundan por la red en numerosos blogs y páginas web. Además, también hay que agradecerle una consulta que realizó a la RAE al respecto, en la que preguntaba por la posible relación que pudiera existir entre el carajo y la cofa. Y hay que destacar que la RAE, a través de su departamento de «Español al día», le indicó que en el diccionario académico esa voz nunca tuvo el significado de puesto de vigía (cofa) desde que fue incluida en 1983, aunque también le reconocieron, tal como se indica en el diccionario, que se trata de una palabra de origen dudoso, ya que por ejemplo en el «Diccionario Náutico Abreviado» de Rubén Poncio de

1991, creado por palabras náuticas corrientes de Argentina, aparece la palabra carajo como sinónimo de cofa. E incluso en el «Diccionario del Español Actual», de 1999, de Manuel Seco Reymundo, lexicógrafo, filólogo y lingüista español, miembro de la RAE, con cargos también en otros países como Colombia y Bolivia, aparece la palabra carajo con el significado de plataforma colocada en la parte alta de un palo, en un barco de vela, es decir, con el significado de puesto de vigía en la cofa.

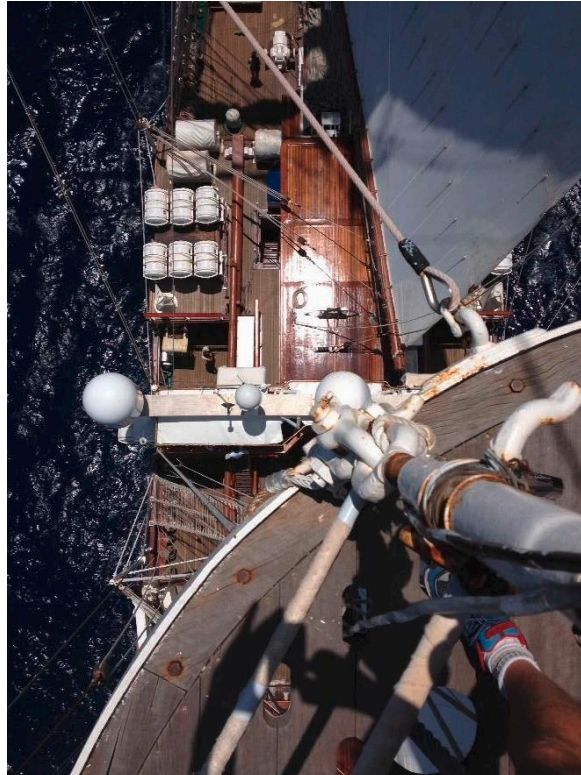


Figura 4. Vista del buque desde la cofa (Fuente: Santiago Díaz Portillo)

3. Conclusiones

Con todo lo comentado hasta ahora, y a pesar de lo gracioso del documento, es muy discutible si el significado de canastilla, plataforma o meseta es acertado cuando se asocia al término carajo, a pesar de que quede demostrado que existen diversos documentos que lo defienden, aunque obviamente falte el principal, el de la RAE. Y es obvio que, en nuestro país, esa meseta, es más conocida asociada a otro término, el de la «cofa». Y comento esto, porque, aunque la RAE no lo respalde, sí que es verdad que el término carajo aparece en diccionarios españoles, y en alguno náutico argentino, como sinónimo de cofa, como ya se ha comentado.

Pero hay que destacar que curiosamente, y a pesar de que en algunos medios se indica de forma errónea, carajo tampoco aparece en el diccionario náutico más antiguo existente en España (1696), denominado «Vocabulario Marítimo, y explicación de los vocablos, que vía la gente de Mar, en fu exercicio del Arte de Marear».

Y por supuesto, lo que sí queda patente es que la cofa, según la RAE, significa «meseta colocada horizontalmente en el cuello de un palo para fijar los obenques de gavia, facilitar las maniobras de las velas altas, y antiguamente, también para hacer fuego con armas ligeras desde allí en los combates».

Destacar también que en el buque escuela Juan Sebastián Elcano la tripulación denomina a las mesetas altas «cofas», y reserva el nombre de «carajo» para el punto más alto del buque, en este caso del palo trinquete, situado a 51 metros de altura. Se trata de un punto importante porque es donde van firme los estays. Pero

en honor a la verdad, tengo que decir que en el libro de maniobra del barco ese punto tampoco aparece así denominado, aunque me confirma un oficial de la tripulación que ellos sí lo utilizan con la denominación de carajo.



Figura 5. Cofas del Juan Sebastián Elcano (Fuente propia)

Dicho todo lo anterior, y a falta de que alguien pueda probar a ciencia cierta el origen del «carajo» asociado a la cofa para que la RAE pueda eliminar el origen dudoso de ese término, lo único que queda patente es que la famosa palabra posee seis letras, y que además define toda la gama de sentimientos humanos y estados de ánimo. Se trata de un término tan misterioso, que al mismo tiempo significa «todo y nada», ya que la persona que no valora la vida dice, «todo me importa un carajo» y aquel que ha visitado todos los lugares del mundo, indica, «ya no tengo a dónde carajo ir», al tiempo que quien quiere despedirse de esta vida exclama, «¡para vivir así, más vale irse al carajo!».

Como pueden ver, hay tantas hipótesis como se quiera del término, pero yo me pregunto, ¿alguna estará relacionada con la «caraja»? Y esta vez me refiero a un tipo de vela. Lo comento porque también hay quien piensa que la palabra carajo procede de una pequeña embarcación llamada de esa misma manera y de su forma de navegar; la que alude a un tipo de vela cuadrada, llamada «caraja», que impulsaba ciertas embarcaciones en América; o de una tribu indígena brasileña, «los carajos», que se desplazaban en barcas por el Amazonas. También se dice que los pescadores de aquellas zonas conocían a los peces voladores como «ca-rajillo a la vela, que lo mismo nada que vuela».

Aunque parezca mentira, una de las expresiones más usadas de nuestro idioma, tiene un pasado oscuro. No ha sido posible establecer con precisión en qué lugar de la tierra fue donde nació el término carajo, al que la gente acude diariamente para expresar sus estados de ánimo, tanto buenos como malos. Este vocablo debe ser de las pocas palabras existentes en nuestra lengua con significado antónimo, es decir, que signifique simultáneamente lo negativo y lo positivo, es decir, lo malo y lo bueno. Como ya se ha explicado, no significa lo mismo «no valer un carajo», que «valer un carajal». Incluso a veces hay que recurrir a la entonación de la palabra para desenmascarar su significado real en cada situación de la vida.

Hay que destacar que con el paso de los años, y aunque el término no sea muy refinado, está perdiendo su connotación de palabra malsonante y se está convirtiendo en un término imprescindible en el lenguaje coloquial.

Pero entonces, finalmente, ¿de dónde carajo proviene el carajo? También se ha demostrado que tampoco es palabra inventada en América, ya que aparece mencionada con sentido picaresco en el «Cancionero de Baena», una colección de poemas recogidos en España hacia 1405 por Juan Alfonso de Baena, para regalárselos al rey Juan II. En ese momento faltaba casi un siglo para el descubrimiento de América. Y, por si fuera poco, los filólogos detectaron que en el año 1247, vivía en la villa de Madrid un hombre al que apodaban Pedro Carajo o Carajuelo. Tampoco se sabe el porqué.

En Colombia, allá en los años treinta del siglo pasado, existió un ilustre profesor llamado López de Mesa, que además fue historiador, médico, psicólogo, político, ministro, lingüista y biólogo, quien afirmó que la palabra carajo era de origen vasco porque, según él, los primeros que la trajeron a Colombia fueron unos soldados vascos que llegaron en tiempos de la Colonia. Lo que no explica el profesor es cómo pudo esa palabrita ser capaz de extenderse por el mundo entero de habla hispana. Aunque pudiera ser que como dicen que los de Bilbao nacemos donde queremos, tal vez de esa forma fueron capaces de extender el vocablo por todas las tierras del mundo.

Hay otra teoría que fija el pasado de la palabra, en su origen portugués o gallego. Carajo (o «carallo» en portugués y gallego), viene del romano «caraculum», que era un poste vertical donde se enganchaban las vides. En algunos documentos medievales, pasó a definirse como «carallo» al poste vertical principal de un buque. Y no podemos olvidar que también de origen romano es la palabra verga, que pasando por el francés verge, denomina al palo horizontal que sujeta las velas. Pudiera ser por esto, que exista alguna relación entre la verga y el carallo.

Para ir finalizando destacar una última teoría que asocia el término carajo a la población canaria. El origen de esta leyenda se remonta a la colonización de Puerto Rico. La lengua española tuvo gran influencia en aquel país como fruto de la emigración canaria. Todavía hoy en día se escuchan expresiones canarias por allí. La leyenda cuenta que la mayor parte de los canarios que llegaron a Puerto Rico pagaban su pasaje en buque con el fruto de su trabajo a bordo. Su falta de profesionalidad como marinos hacía que les asignaran los peores trabajos, entre ellos los de actuar de vigías en lo alto del palo mayor, o sea en la cofa o el carajo. Y esa falta de costumbre a ir colocados en sitios tan altos e inestables, era lo que les hacía ser propensos a los mareos y vómitos. Y por ello parece que los canarios asociaban la palabra «carajo» a los males producidos por estar allí arriba, como ya se ha comentado.

Y ya, para finalizar este artículo, me gustaría despedirme indicando que espero que este trabajo, mezcla de humor, fantasía, realidad, costumbres e historia:

«¡LES HAYA GUSTADO MÁS QUE EL CARAJO!».

Referencias bibliográficas

Kepa, J. (21 de diciembre de 2010). Enseñanzas Náuticas. Obtenido de <<https://nauticajon-kepa.wordpress.com/2010/12/21/origen-de-la-palabra-carajo/>>

Sagarra, J. d. (21 de enero de 1999). TRIBUNA: EL PAÍS. Obtenido de <https://elpais.com/diario/1999/01/21/catalunya/916884444_850215.html>

Villa Caro, R. (8 de enero de 2015). Blog Exponav. Obtenido de <<https://www.exponav.org/el-carajo-de-la-vela/>>

LA SINCRONIZACIÓN Y SU PROBLEMÁTICA EN LAS COMUNICACIONES DE BANDA ANCHA

AF (CGA) D. EDUARDO DE MADARIAGA SÁNCHEZ

Ingeniero de Telecomunicaciones

Escuela Naval Militar

edemsan@mde.es

1. Introducción

La técnica de modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [1] se utiliza actualmente en numerosas tecnologías dentro del mundo de las comunicaciones. Estándares como LTE (*Long Term Evolution*) referido a las comunicaciones móviles de cuarta generación (4G), la televisión digital terrestre en la norma europea DVB-T (*Digital Video Broadcasting-Terrestrial*), la transmisión de datos a través de la tecnología WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwaves Access*), el estándar IEEE 802.11 para redes de área local inalámbricas WLAN (*Wireless Local Area Networks*) y, el acceso a internet de banda ancha ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) entre otros, aplican este tipo de modulación.

Esta técnica supone un gran avance para las comunicaciones digitales de banda ancha, tanto para guías ópticas o metálicas (en lugar de OFDM se suele usar el término DMT, *Discrete Multitone*) como para medios inalámbricos, ya que permite la transmisión de altas tasas binarias en canales de carácter hostil.

El principio fundamental o concepto clave de OFDM se basa en la división del espectro disponible en varios subcanales donde la información está modulada en múltiples portadoras, cada una a distinta frecuencia como establece la técnica FDM (*Frequency Division Multiplexing*) pero con la diferencia de que las portadoras son ortogonales entre sí.

Diversos sistemas militares fueron los pioneros en utilizar modulaciones multiportadora para comunicaciones en enlaces de HF (*High Frequency*) a finales de los años 50 y principios de los 60. El módem *Kineplex* de Collin (1958) [2] se convirtió en el primer módem que, para transmisión de voz con modulación fija en todos los subcanales, empleaba los principios multicanal (de forma muy elemental). De nuevo en el ámbito de las comunicaciones HF militares, años después, el módem *KATHRYN* [3] posibilitaba ajustar distintos esquemas de codificación y modulación en las subportadoras.

Entre todas las ventajas que puede proporcionar esta modulación, se puede destacar principalmente la robustez que presenta ante los problemas que produce la propagación multirrayecto, un uso bastante más eficaz del espectro, la sencillez que mantiene al realizar la modulación y demodulación mediante IFFT y FFT (*Inverse Fast Fourier Transform* y *Fast Fourier Transform*), la flexibilidad para poder adaptarse a sistemas de gran ancho de banda gracias a la ecualización en el dominio de la frecuencia, compatibilidad con técnicas MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), además de la inserción de un prefijo cíclico (CP - *Cyclic Prefix*) que provoca la eliminación de los efectos producidos por las interferencias intersimbólicas (ISI - *Inter Symbol Interference*).

Sin embargo, las ventajas de OFDM son solo útiles cuando la ortogonalidad se mantiene. En caso de que la ortogonalidad no esté suficientemente garantizada, se corre el riesgo de que el «comportamiento» del sistema no sea el adecuado debido a la ISI y a la ICI (*Inter Carrier Interference*).

Es por ello, que la sincronización en OFDM, la cual debe realizarse tanto en tiempo como en frecuencia, es realmente importante y motivo de amplios estudios. De hecho, la sincronización es uno de los puntos cruciales a la hora de diseñar cualquier sistema OFDM. Los errores de sincronización en OFDM pueden deformar los símbolos recibidos o provocar interferencia entre subportadoras.

2. Transmisión OFDM

Ya se ha explicado en lo que consiste OFDM, una división del ancho de banda disponible BW en N subcanales, cada uno de ellos asignado a una subportadora, ortogonales entre sí [1]. Así pues, la separación obtenida entre dichas subportadoras será $\Delta f = BW/N$. Conviene resaltar que, estas subportadoras podrán transportar o no un símbolo complejo. Todos ellos se transmitirán de forma paralela (es por ello que también se denomina transmisión paralela). T_s , el tiempo de símbolo OFDM, se obtendrá de la relación $T_s = \frac{1}{\Delta f} = N/BW$. Las frecuencias de cada una de las subportadoras, considerando f_o la frecuencia menor vendrán dadas por la ecuación:

$$f_k = f_o + \frac{k}{T_s} = f_o + \frac{k \cdot BW}{N}, k = 0, \dots, (N - 1) \quad (2.1)$$

Esto se consigue empleando las siguientes funciones ortogonales base en el transmisor:

$$\Phi_k^l(t) = g_k(t - lT_s) \quad (2.2)$$

donde el superíndice l indica la transmisión en el símbolo OFDM l –ésimo (no olvidemos que la transmisión se realiza símbolo a símbolo y, por ello, si se quiere describir este fenómeno continuo se requiere el uso de este superíndice), y $g_k(t)$ se puede escribir como:

$$g_k(t) = \begin{cases} g_{T_s}(t) \cdot e^{j2\pi f_k t}, & \text{si } t \in [0, T_s], \\ 0, & \text{resto} \end{cases} \quad (2.3)$$

donde $g_{T_s}(t)$ es el filtro de transmisión definido en el intervalo $[0, T_s]$. En ocasiones, dicho filtro de conformado de la señal suele ser rectangular, es decir:

$$g_k(t) = \begin{cases} 1, & \text{si } t \in [0, T_s], \\ 0, & \text{resto} \end{cases} \quad (2.4)$$

En este artículo se asumirá, de cara a las simulaciones, que el filtro de conformado de la señal es rectangular. Las señales base ortogonales deberán cumplir $\forall l$:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_k^l(t) \cdot \Phi_m^l dt = 0, k \neq m \quad (2.5)$$

cuya norma $\int_{-\infty}^{+\infty} \|\Phi_k^l(t)\|^2 dt = T_s$. Para conseguir la ortonormalidad de las funciones base, se redefine la ecuación (2.3):

$$g_k(t) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{T_s}} \cdot e^{j2\pi f_k t}, & \text{si } t \in [0, T_s], \\ 0, & \text{resto} \end{cases} \quad (2.6)$$

Empleando este conjunto de funciones base ortonormales, y dado que cada señal es modulada por un pulso en una subportadora distinta, es común interpretar OFDM como una forma de multiplexar N señales de baja tasa de transmisión (cada una en una sub-portadora diferente). En la figura 2-1 se muestra esta interpretación.

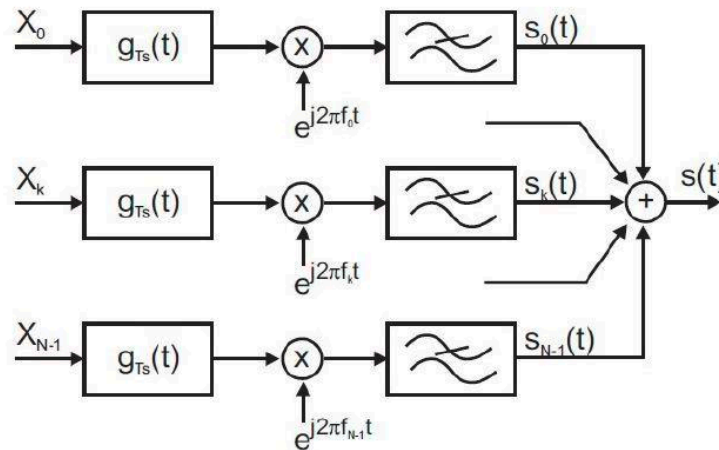


Figura 2-1. Modulador en tiempo continuo OFDM (fuente [1])

La contribución de cada una de estas señales constituye la señal modulada OFDM (utilizando un filtro rectangular para conformar la señal):

$$S^l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k^l \cdot \Phi_k^l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k^l \cdot e^{j2\pi \frac{BW}{N} k(t-lTs)} \quad (2.7)$$

donde X_k^l es el símbolo complejo en la subportadora k del símbolo l .

A partir de este modelo continuo en el tiempo, se obtiene el modelo en tiempo discreto, reemplazando el proceso de modulación por la transformada inversa de Fourier, IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*). En el lado del receptor, en lugar de la IDFT se utilizará la DFT (*Discrete Fourier Transform*).

3. Sincronización en sistemas OFDM

Tal y como se ha comentado anteriormente, la sincronización es una de las principales dificultades que presenta la técnica de modulación OFDM. En este apartado se analiza el problema de falta de sincronización en tiempo (STO - *Symbol Time Offset*), y sus efectos en los receptores OFDM mediante el uso de MATLAB para llevar a cabo las simulaciones. No debe olvidarse que, así como existe la desalineación temporal, OFDM también presenta problemas de sincronización en frecuencia (el cual excede el contenido de este artículo).

3.1 Sincronización en tiempo

Si existe un desajuste en tiempo de δ muestras, la ventana en la que se realiza la DFT se desplazará también δ muestras, lo que generará una rotación de los datos demodulados y, por tanto, un decremento en las prestaciones globales del sistema. Matemáticamente, esto es debido a las propiedades de la DFT. De una manera sencilla, consiste en lo siguiente:

$$f(t) \rightarrow F(\Omega) \quad (3.1)$$

$$f(t - \delta) = e^{-j\Omega\delta} \cdot F(\Omega) \quad (3.2)$$

Debido a esto, la sincronización en tiempo debe llevarse a cabo para detectar el punto de inicio de cada símbolo OFDM (con el prefijo cíclico ya suprimido), lo cual facilitará la obtención de las muestras exactas de la señal transmitida. Dependiendo de la localización del punto de inicio estimado del símbolo OFDM, el efecto provocado por STO puede ser diferente. En la figura 3-1 se muestran cuatro casos diferentes.

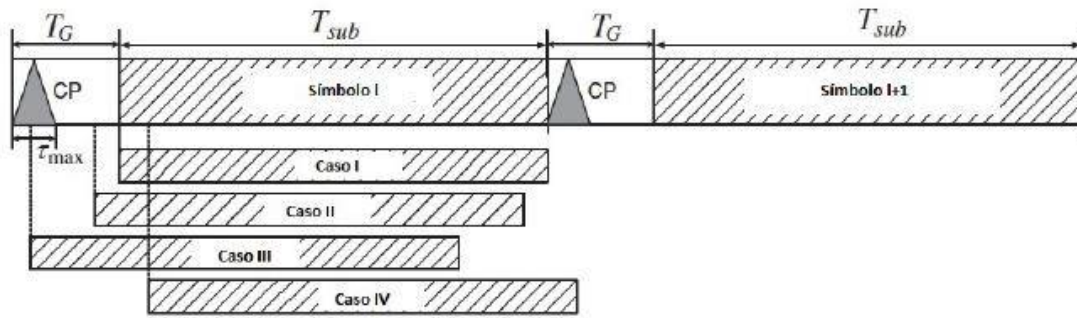


Figura 3-1. Transmisión OFDM con desajustes temporales (elaboración propia)

Si δ es un número positivo de muestras, en lugar de realizar la DFT sobre los datos del símbolo a procesar, parte de ellos serán muestras del prefijo cíclico del siguiente símbolo y, por tanto, no solo se producirá una rotación, sino que además existirá interferencia entre símbolos OFDM, puesto que parte de la información se estará tomando del símbolo OFDM adyacente. En este caso, la degradación es mucho mayor. Así mismo, si el número de muestras de desajuste δ es negativo, las muestras se tomarán del prefijo cíclico, es decir, de datos válidos y si tendrá sentido hablar de rotación de los datos. En ese caso las prestaciones no se van a ver prácticamente afectadas y, a efectos prácticos, se obtienen resultados muy similares a los que resultarían si la sincronización hubiese sido perfecta. No obstante, esto es cierto siempre y cuando δ sea pequeño, pues no se debe olvidar que las muestras del prefijo cíclico suelen estar afectadas por la ISI. A medida que δ se haga mayor, la probabilidad de que parte de las muestras del CP hayan sido afectadas más seriamente por la ISI aumenta, lo que conlleva que la probabilidad de error se vea incrementada.

En la figura 3-2 se pueden observar los efectos provocados por el STO en función del valor que este tome. Haciendo uso de MATLAB, se han obtenido los cuatro casos expuestos anteriormente.

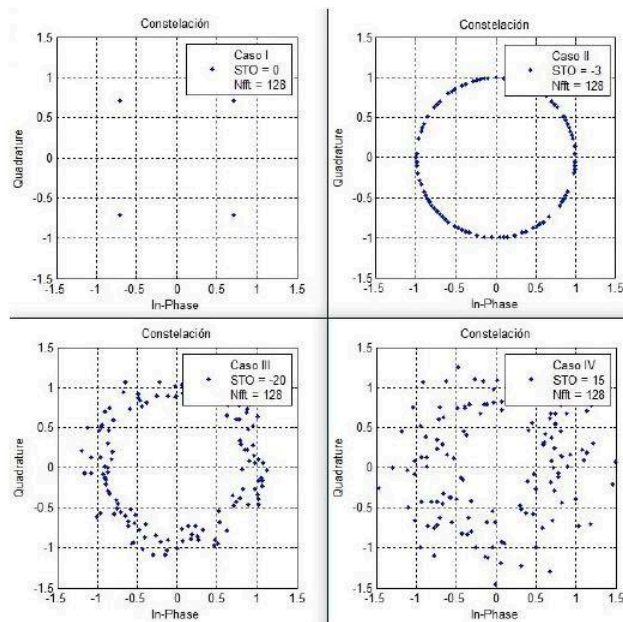


Figura 3-2. Constelación en función del STO (δ) (elaboración propia)

El caso I muestra la situación ideal, donde el símbolo puede ser recuperado perfectamente. En el caso II, el símbolo OFDM l no se solapa con el anterior. Por ello, no se produce ISI con dicho símbolo. En el caso III, el punto de inicio del símbolo OFDM es estimado antes de la finalización de la respuesta del canal. Se destruye

la ortogonalidad entre subportadoras debido a la ISI y, además, aparece ICI. En el caso IV, el punto de inicio del símbolo OFDM es estimado después del valor exacto. De nuevo, se destruye la ortogonalidad entre subportadoras.

3.2 Algoritmos de sincronización de tiempo

Tal y como se ha demostrado anteriormente, es crucial emplear una técnica precisa de cara a que el sistema no se degrade en demasía. En este artículo, se han comparado algoritmos PSA (*Pilot Symbol Aided*). Estos métodos, requieren de una información conocida en ciertas subportadoras (subportadoras piloto) para la sincronización. Suelen llevar aparejado una pérdida pequeña en eficiencia puesto que esas subportadoras no transportan datos. No obstante presentan gran robustez y los estándares que utilizan OFDM suelen disponer de ciertas subportadoras piloto, que pueden ser utilizadas para la sincronización, la estimación del canal y/o el seguimiento de la desviación de frecuencia.

A su vez, los algoritmos PSA se pueden dividir en dos clases:

- **Basados en preámbulos:** los preámbulos son símbolos OFDM completamente conocidos tanto por el emisor como por el receptor, formados generalmente por secuencias PN. Estas secuencias se suelen diseñar de forma adecuada con buenas propiedades de correlación.
- **Basadas en subportadoras piloto repartidas en el símbolo OFDM:** utilizan la información en las subportadoras piloto que se encuentran repartidas en los símbolos OFDM.

Este artículo tiene como objetivo los algoritmos basados en preámbulos, por lo que los basados en subportadoras piloto simplemente quedan mencionados.

Dentro de los algoritmos PSA basados en preámbulos, se han comparado las técnicas propuestas en *Schmidl and Cox* [4] (fueron los primeros en utilizar la repetición de dos símbolos en la transmisión para estimar el origen del símbolo), *Minn et al.* [5] (tanto el método *Sliding Window* como *Training Symbol*) y el algoritmo de *Park et al.* [6]. Se recomienda al lector revisar las publicaciones de los algoritmos de cara a entender el diseño de preámbulos que propone cada método y la matemática que encierra cada uno.

En la figura 3-3, se puede observar la comparación de las cuatro técnicas aquí propuestas en condiciones ideales. Puede observarse como el algoritmo de *Park et al.* Ofrece una mejor estimación del inicio del símbolo.

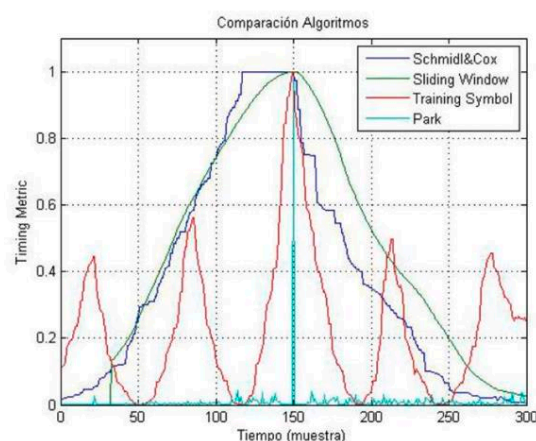


Figura 3-3. Comparación algoritmos canal ideal (elaboración propia)

4. Simulaciones

A lo largo de este apartado se estudia el comportamiento de los algoritmos descritos anteriormente realizando una comparación entre ellos de manera simulada con la herramienta MATLAB. En todas las gráficas, el eje «y» representa la SER y el eje «x» representa la SNR.

Con respecto a los canales utilizados, se han elegido dos tipos de canales estandarizados. En primer lugar, el canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). Es uno de los modelos matemáticos más simples para varios canales físicos de comunicaciones, incluyendo los cableados y los canales radio. Así mismo, se hace uso del canal UIT-R (*Unión Internacional de Telecomunicaciones – Radio*) IMT-2000.

4.1 Canal AWGN

La figura 4-1 muestra el comportamiento de los algoritmos propuestos anteriormente en un canal AWGN. En la gráfica se puede comparar la SER para un determinado valor de SNR en los diferentes casos.

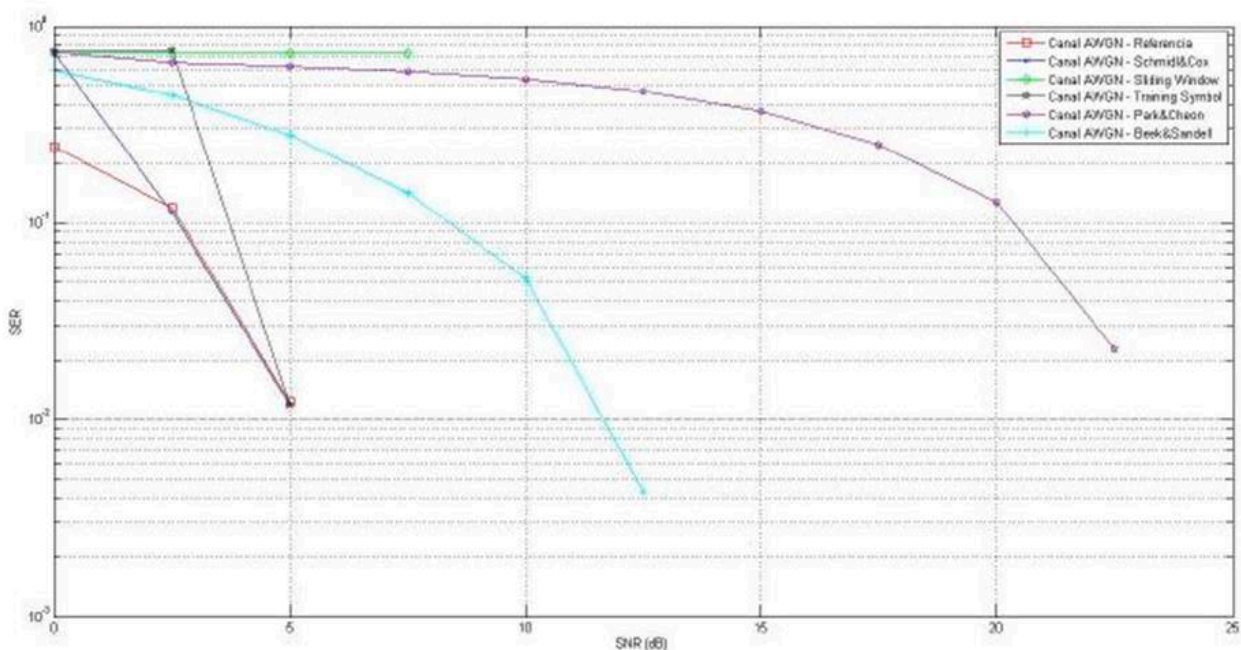


Figura 4-1. Canal AWGN (elaboración propia)

Tal y como se puede apreciar, *Schmidl and Cox* es el algoritmo que mejores resultados ofrece para el canal AWGN. A partir de 2.5 dB, la estimación que ofrece es excelente ya que es capaz de igualar a la referencia. Una vez alcanzados los 5 dB, se supera la máxima *Symbol Error Rate* que se desea alcanzar.

En *Minn et al.* también se puede encontrar un algoritmo lo suficientemente robusto para este canal. De los dos propuestos, es *Training Symbol* el que mejor resultado ofrece. A los 5 dB, «consigue» emparejarse con la referencia y *Schmidl and Cox*.

Finalmente, el método propuesto en *Park et al.* Ofrece unos resultados (contra todo pronóstico) bastante «pobres».

4.2 Canal ITU

La figura 4-2 muestra el comportamiento de los algoritmos propuestos anteriormente en un canal ITU. En la gráfica se puede comparar la SER para un determinado valor de SNR en los diferentes casos.

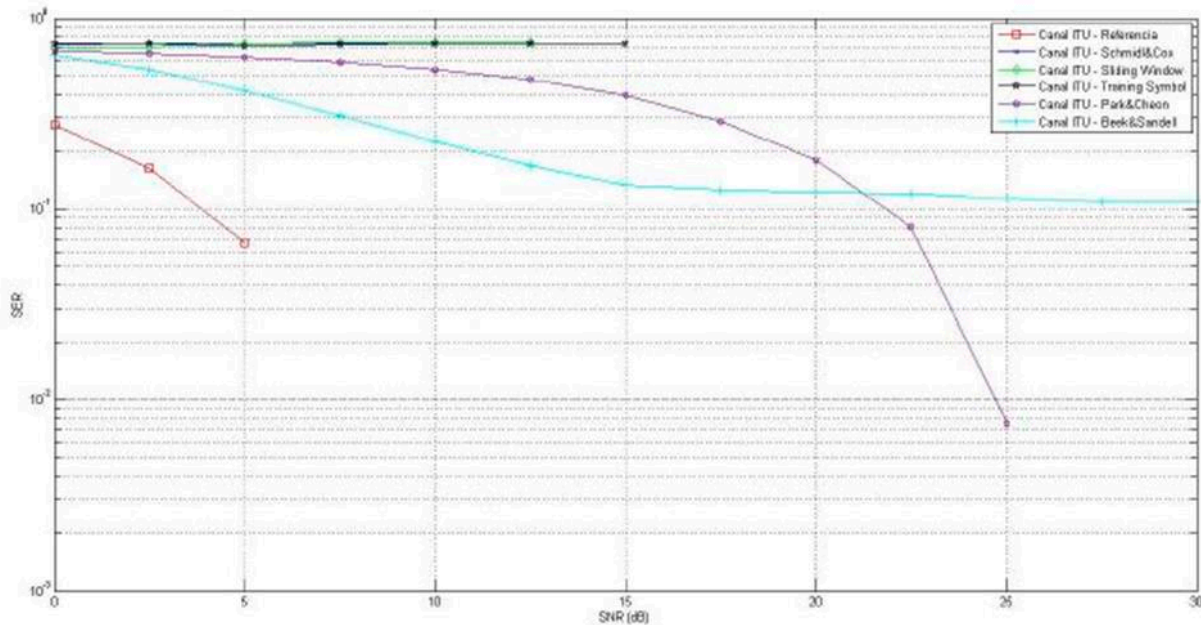


Figura 4-2. Canal ITU (elaboración propia)

Al realizar la simulación en un canal más complejo, es *Park et al.* El método que mejor resultado da. A partir de 25 dB supera la máxima *Symbol Error Rate* que se desea alcanzar.

5. Conclusiones

Existen un gran número de ventajas que justifican el amplio uso de OFDM en diferentes estándares de comunicación. Sin embargo, OFDM también presenta diversas desventajas. Entre ellas, destaca el error de sincronismo en la transmisión, el cual puede provocar serios errores en la recuperación de la información por parte del receptor (véase figura 3-2). Esto es debido, fundamentalmente, a una pérdida de ortogonalidad entre cada par de portadoras adyacentes.

Las simulaciones realizadas han puesto de manifiesto que para poder elegir de manera adecuada la técnica de estimación a emplear, es necesario realizar un estudio comparativo entre los diversos métodos. Mediante el estudio de los algoritmos, se ha demostrado como en el canal AWGN la mejor solución la proporcionaba *Schmidl and Cox* (a pesar de que la métrica que proponen proporciona una zona plana que dificulta la selección adecuada del desfase en el tiempo).

Este artículo tiene la intención de mostrar al lector las bondades que la modulación OFDM ofrece a las comunicaciones de banda ancha, así como su sensibilidad a los errores de sincronización. Sin embargo, conviene resaltar que este campo abarca mucho más y que, lo aquí mostrado, es una mínima parte. Como ejemplo, y a raíz de lo visto en el párrafo introductorio del apartado 3, además de la desalineación temporal debe estudiarse su homóloga en frecuencia de cara a obtener unos resultados completos.

Referencias bibliográficas

- [1] V. P. Gil Jiménez, «Algoritmos en transmisión y recepción para OFDM en entornos multi-usuario», Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2005.
- [2] M. Doeltz, E. Head and D. Martin, «Binary data transmission techniques for linear systems», *Proc. IRE*, 45, 656-661, 1957.
- [3] M. S. Zimmermann and A. Kirsch, «The AN/GSC-10 (KATHRYN) Variable Rate Data Modem for HF Radio», *IEEE trans. On Communications*, 15(2), 197-204, 1967.
- [4] T. M. Schmidl and D. C. Cox, *Robust Frequency and Timing Synchronization for OFDM*, *IEEE Trans. on Communications*, 45(12), 1613-1621, 1997.
- [5] H. Minn, M. Zeng and V. Bhargava, *On timing offset estimation for OFDM systems*, *IEEE Communications Letters*, 4(7), 242-244, 2000.
- [6] B. Park, H. Cheon, C. Kang and D. Hong, *A novel timing estimation method for OFDM systems*, *IEEE Communications Letters*, 7(5), 239-241, 2003.

INTRODUCCIÓN A LAS TÉCNICAS DE CLASIFICACIÓN Y REGRESIÓN ASOCIADAS AL APRENDIZAJE AUTOMÁTICO

D. PABLO LUCAS CÁNOVAS

*Alumno de Master en Industria 4.0 en prácticas UPCT-Armada española,
Arsenal de Cartagena-CESADAR (Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada),
Cartagena, España*

AN (CIA) D. FRANCISCO LAMAS LÓPEZ

*Responsable técnico CESADAR-Central (Dr. Ing.), Armada española,
Arsenal de Cartagena-CESADAR (Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada),
Cartagena, España*

Contacto: flamlop@mde.es

Abstract: Nowadays technology is growing unstoppable in our society, the amount of data is huge to work manually with them and it has become a problem for the human being. The traditional methods begin to become obsolete and we have to think in other techniques that allow us, in a simpler and more efficient way, to collect and process this information to use it for a purpose. For this, the human being is directing his efforts to the field of AI for the analysis, processing and interpretation of the data. This branch of science emerged in the late twentieth century but could not settle for the technological limitations of the time, therefore, we can say that it is not a new science. The AI techniques branch out in methodologies such as machine learning, natural processing language, expert systems, robotics, etc. In this study we will focus on analyzing the most important methods of machine learning, which will help to build the bases for the digitalization of the logistics processes with which the CESADAR center has been committed. It can be concluded that the implementation of this set of techniques can help future decision making, which could have a great impact in terms of risk, costs, resources and availability for the success of a mission.

Keywords: artificial intelligence, machine learning, supervised learning, unsupervised learning, reinforcement learning, semi-supervised learning, regression algorithms, clustering algorithms, classification algorithms.

Resumen: Este artículo es meramente divulgativo y pretende introducir al lector en los diferentes grandes grupos de técnicas asociadas al aprendizaje automático. Hoy en día la tecnología avanza a pasos agigantados en nuestra sociedad, la cantidad de datos que se mueven es inabarcable para trabajar manualmente con ellos y comienza a suponer un problema para el ser humano. Los métodos tradicionales empiezan a quedarse obsoletos y tenemos que recurrir a otras técnicas que nos permitan, de manera más sencilla y eficaz, recopilar y procesar esta información para usarla con un fin. Para ello, el ser humano está dirigiendo sus esfuerzos al campo de la IA para el análisis, procesamiento e interpretación de los datos. Esta rama de la ciencia surgió a finales del siglo XX pero no pudo asentarse por las limitaciones tecnológicas de la época, por tanto, podemos decir que no es una ciencia novedosa. Las técnicas de IA se ramifican en metodologías como son el aprendizaje automático (*Machine Learning*), lenguaje de procesamiento natural (*Natural Language Processing*), sistemas expertos, robótica, etc. En este estudio nos centraremos en analizar los métodos de aprendizaje automático más importantes en la actualidad, que servirá de ayuda para construir las bases y cumplir con la digitalización de los procesos logísticos con los que está comprometido el centro CESADAR. Se puede concluir que gracias a este conjunto de técnicas se ayudará a la futura toma de decisiones, lo cual supondrá un gran impacto en términos de riesgo, costes, recursos y disponibilidad para el éxito de una misión.

Palabras clave: inteligencia artificial, aprendizaje automático, aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado, aprendizaje por refuerzo, aprendizaje semi-supervisado, algoritmos de regresión, algoritmos de clustering, algoritmos de clasificación.

1. Introducción

Durante la década de 1990, al proceso de analizar datos para descubrir conexiones ocultas y poder predecir tendencias futuras se le llamó por primera vez como «minería de datos». Su base está soportada por diferentes disciplinas científicas que son la estadística, la Inteligencia Artificial (IA) y dentro de la misma, el *Machine Learning* (ML). Estas técnicas de minería de datos han evolucionado notablemente durante la última década, permitiendo un procesamiento computacional más poderoso y económico, debido a la necesidad de controlar los volúmenes de datos que se mueven y que van en incremento año tras año.

Lo que conocemos actualmente como *Machine Learning*, no es una ciencia novedosa. Sus inicios se remontan a la década de 1950, cuando Arthur Samuel, pionero en el campo de la informática y la inteligencia artificial, creó el primer programa de aprendizaje informático. El software consistía en un programa que jugaba a las damas y aprendía con cada partida jugada. Por tanto, podemos decir que nació del reconocimiento de patrones y de la teoría que dice que los computadores pueden aprender a realizar tareas autónomas gracias a los datos. El aspecto iterativo es importante, ya que le permite adaptarse a nuevas situaciones gracias a los patrones aprendidos en cálculos previos para tomar decisiones con futuros datos proporcionados.

Lo que se pretende en esta comparativa introductoria es dar a conocer los algoritmos más populares de *Machine Learning* para aprendizaje automático, analizando brevemente su funcionamiento. El objetivo del CESADAR es desarrollar un sistema que sea capaz de aprender en base a un conjunto de datos de entrada para reconocer patrones de comportamiento, realizar predicciones y clasificar estados. Para ello, el CESADAR se encuentra en la fase de *analítica en tierra*, donde los procesos de IA están siendo desarrollados actualmente para posteriormente ser escalados y equipados en embarcaciones que puedan realizar *analítica a bordo* y en tiempo real [1].

2. Antecedentes

En los últimos años se ha observado un incremento notable del interés de las empresas e instituciones por la IA y las técnicas de aprendizaje automático, este aumento de popularidad va ligado directamente al mismo incremento que ha sufrido la minería de datos, ambos en una situación propicia por las mejoras tecnológicas en procesamiento computacional y almacenamiento de datos [2]. Como podemos observar en la **Figura 1**, ya en 2004 había un gran interés por la IA en la sociedad, pero no se disponía de los recursos necesarios para poder explotar y procesar grandes cantidades de datos por lo que el interés fue disminuyendo. No ha sido hasta 2014 cuando observamos este salto tecnológico que ha impulsado durante los siguientes años hasta la actualidad las técnicas de IA, y en particular las basadas en aprendizaje automático.



Figura. 1. Popularidad en internet a nivel global: ML vs DL (elaboración propia). Datos obtenidos de Google Trends [3]. Un valor de 100 indica la popularidad máxima de un término, mientras que 50 y 0 indican que un término es la mitad de popular en relación con el valor máximo o que no había suficientes datos del término, respectivamente.

En este estudio se van a analizar modelos de IA basados en técnicas de Machine Learning para aprendizaje automático supervisado y no supervisado. Esta comparativa es importante para conocer los algoritmos más importantes sobre los que se sustentan están técnicas de aprendizaje automático y que son la base de la futura digitalización de los procesos logísticos en la Armada.

Lo que conocemos como *Machine Learning* es una rama de la inteligencia artificial (IA) cuyo objetivo es el desarrollo de algoritmos que permitan a las máquinas aprender en base a un conjunto de datos que les aportamos [4]. Cuando hablamos de aprendizaje nos referimos al contexto de identificar patrones complejos entre millones de datos. Sus pilares fundamentales son el uso de algoritmos basados en técnicas matemáticas (probabilidad, estadística, optimización, clasificación...) que permiten realizar inferencias a partir de datos. Aunque ha habido varias definiciones sobre el aprendizaje automático, una de las más referenciadas [5] ha sido la de Tom Mitchell en 1997: «Es un programa de computador que aprende de la Experiencia E , respecto a alguna tarea T y con medida de rendimiento P , si el desempeño sobre la tarea T , medido por P , mejora con la experiencia E .»

¿Por qué usar Machine Learning? Existen multitud de casos en los que analizar un evento y tratar de determinar su naturaleza mediante algoritmos basados en reglas no es la manera más eficaz de abordarlos, por ejemplo, distinguir spam entre un conjunto de correos de entrada [6]. En un algoritmo basado en reglas un supervisor debe estar comprobando de manera continua los correos entrantes y actualizar periódicamente los algoritmos con nuevas reglas para conseguir un filtrado más selectivo. Aunque el problema no sea trivial, el programa puede convertirse a una larga lista de complejas reglas difíciles de mantener. Por el contrario, un filtro de correos spam basado en técnicas de Machine Learning aprende que palabras o frases son buenos predictores de correos spam y compara patrones de palabras entre ellos. De esta manera, tenemos un algoritmo más reducido en tamaño de código, más fácil de mantener y más preciso.

3. Tipos de algoritmos de aprendizaje

Distinguimos dos tipos principales de algoritmos basados en técnicas de Machine Learning: los algoritmos basados en modelos de aprendizaje supervisado (**Fig. 3a**) y no supervisado (**Fig. 3b**). La principal diferencia

que existe entre ambos tipos es que en el primero nuestros datos ya contienen la información que tratamos de predecir. Comúnmente a esto se conoce como datos etiquetados, conocemos de antemano los resultados por lo que podemos ir ajustando el aprendizaje para indicarle a la red cuando ha fallado. Mientras que en el segundo la red no recibe ayuda externa que le indique si la salida generada es correcta o no. La propia red intenta buscar características, correlaciones o categorías en común de entre todo el conjunto de datos que recibe a la entrada. Los algoritmos de una clase no están supeditados a esa única clase, muchos tipos de algoritmos pueden ser usados tanto de forma supervisada como no supervisada dependiendo de su cometido [7].

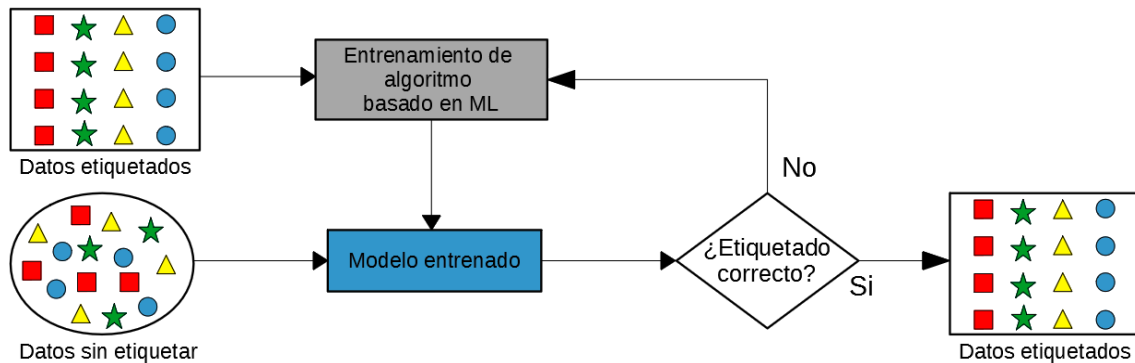


Figura. 3a. Modelo de aprendizaje supervisado

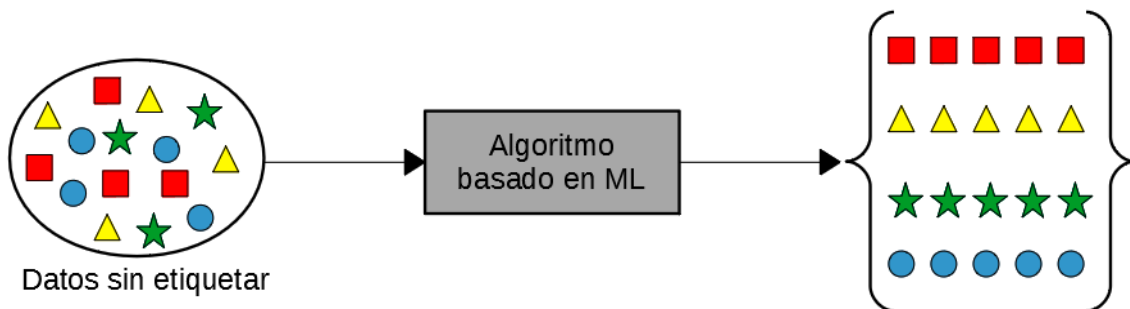


Figura. 3b. Modelo de aprendizaje no supervisado

Otros algoritmos que merece la pena destacar son los basados en aprendizaje por refuerzo (**Fig. 4a**) y de aprendizaje semi-supervisado (**Fig. 4b**). En el primer caso el sistema de aprendizaje es llamado *agente* en este contexto, dicho agente interactuará con el entorno en función de los datos que tenga sobre este, lo que le ayudará a distinguir una situación de otra y realizar acciones. Basado en estas acciones obtiene una recompensa o penalización, al agente no se le indica directamente que acciones debe realizar, sino que debe aprender por sí mismo cual es la mejor estrategia, llamada *política*, que maximice el número de recompensas. Estas acciones no solo afectarán a la recompensa inmediata, sino a las que sucedan posteriormente. Una *política* define qué acción debe elegir el agente cuando se encuentra en una situación determinada.

En el segundo caso el algoritmo utiliza datos de entrenamiento etiquetados y no etiquetados, usualmente una pequeña cantidad de datos etiquetados junto con una gran cantidad de datos sin etiquetar. Este tipo de algoritmos suelen estar constituidos por combinaciones de algoritmos supervisados y no supervisados. Dichos algoritmos pretenden generar modelos predictivos más precisos gracias al entrenamiento con un conjunto de datos etiquetados y sin etiquetar simultáneamente.

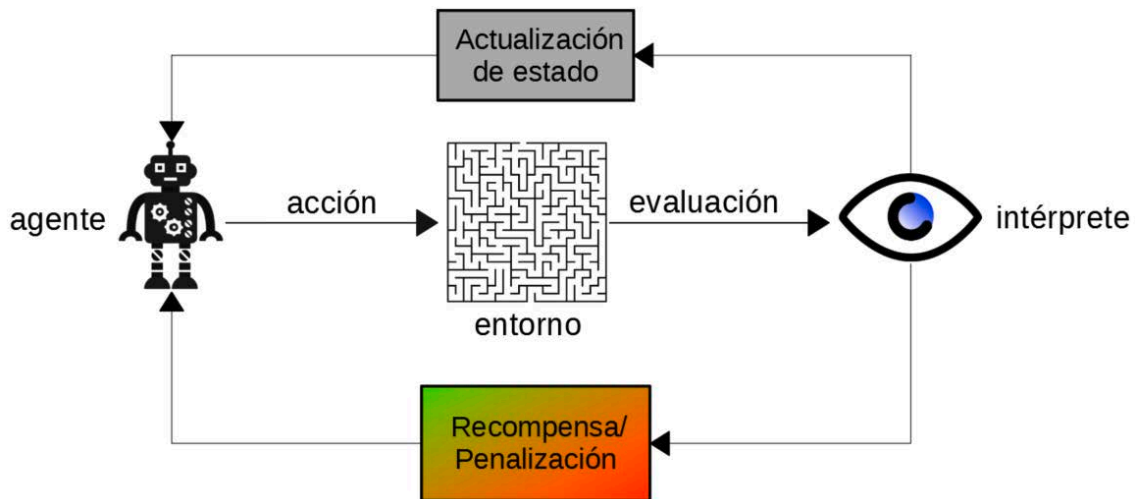


Figura. 4a. Modelo de aprendizaje por refuerzo

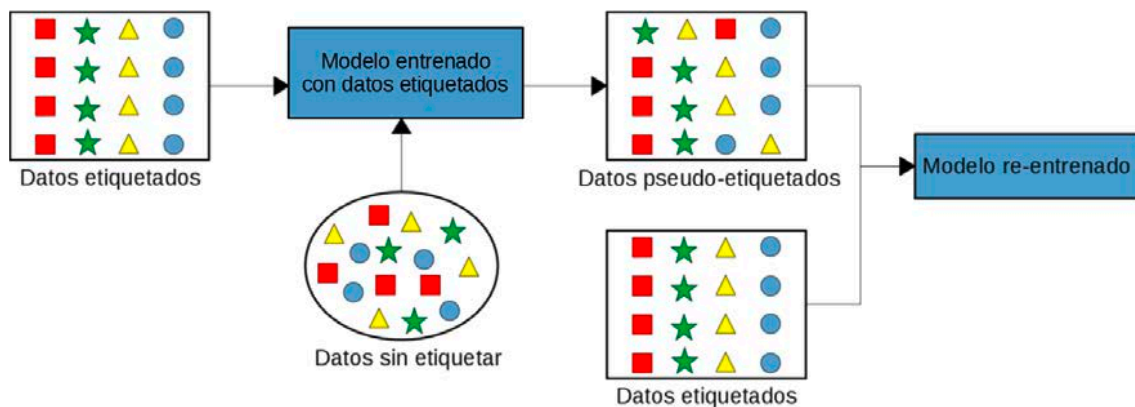


Figura. 4b. Modelo de aprendizaje semi-supervisado

4. Comparativa

Vamos a realizar la comparativa basándonos en los tipos de algoritmos que se repiten con más frecuencia para la resolución de problemas siendo estos los algoritmos de regresión, clasificación y clustering. Cuando los algoritmos modelan una relación entre distintas variables utilizando una medida de error que se intenta minimizar con cada iteración para que las predicciones futuras sean lo más ajustadas posibles, estamos hablando de **algoritmos de regresión (Fig. 5)**, de tipo supervisado. Distinguimos la regresión lineal y regresión logística. La **regresión lineal** pretende representar una recta que se ajuste lo mejor posible a nuestros datos. Es un algoritmo supervisado que nos indica la tendencia que sufre un conjunto de datos continuos. Este algoritmo intenta representar una relación lineal entre variables independientes y una variable de salida o dependiente. Normalmente se usa el método de mínimos cuadrados para calcular esta relación. Por otro lado, en la **regresión logística**, contrario a la regresión lineal, no esperamos obtener un resultado numérico sino una variable categórica en función de variables independientes. Por tanto, a partir de un conjunto de datos de entrada obtenemos una salida discreta, correspondiente a un estado que pretendemos predecir.

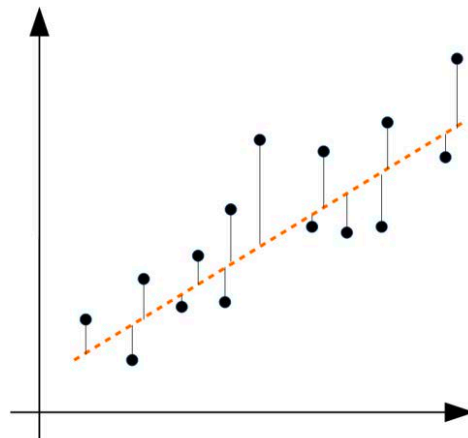


Figura. 5. Ejemplo de regresión lineal

Cuando hablamos de agrupar un conjunto de datos existentes de los que desconocemos las características que comparten y queremos encontrar las relaciones entre estos datos, nos referimos a **algoritmos de clustering (Fig. 6)**, de tipo supervisado y no supervisado. Este tipo de métodos crean puntos centrales y jerarquías para identificar grupos y buscar características comunes por cercanía. Destacamos K-Medias y Detección de anomalías. El objetivo de **K-Medias** es agrupar puntos de datos similares sin etiquetar y descubrir patrones subyacentes. Para lograr este objetivo, este busca un número fijo (k) de clusters en el conjunto de datos. La letra k hace referencia al número de centroides que definimos, el centroide representa el centro del cluster. En otras palabras, el algoritmo k -medias identifica k número de centroides y coloca los datos en su cluster más cercano, manteniendo los centroides lo más pequeños posible. Por otro lado, la **Detección de anomalías** tiene como función detectar si un dato escapa a los rangos de normalidad del resto de los datos. El tratamiento de los datos anómalos debe hacerse con cuidado, ya que en ocasiones se podrá descartar (cuando son errores de medición) y en otras será información importante (malfuncionamiento de algún componente). Un dato anómalo puede desplazar el centroide de un cluster hacia su posición o modificar notablemente la tendencia de una recta de regresión.

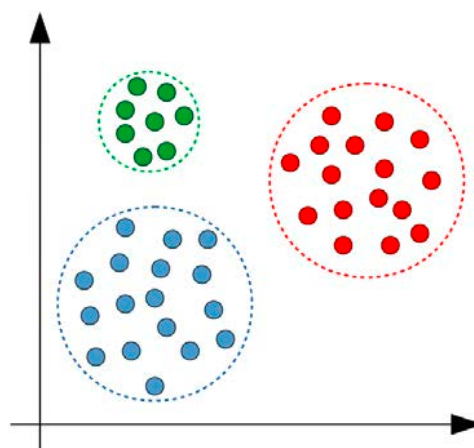


Figura. 6. Ejemplo de clustering

Cuando el sistema trata de etiquetar un conjunto de datos basándose en sus características para clasificarlos dentro de una categoría estamos hablando de **algoritmos de clasificación**. Para este tipo de algoritmos existen muchos modelos útiles que podemos usar entre los que destacamos: redes neuronales, K vecinos más cercanos, árboles de decisión, bosques aleatorios, máquina de vectores de soporte (SVM) y Naive Bayes.

Todos ellos pueden ser utilizados como algoritmos de aprendizaje supervisado y algunos de ellos como no supervisados como se puede ver en **Tabla 1**.

Tabla 1. Comparativa de los principales algoritmos de aprendizaje

	Algoritmo	Supervisado	No supervisado	Por refuerzo
Regresión	Regresión lineal	X	-	-
	Regresión logística	X	-	-
Clustering	K-Medias	X	X	-
	Detección de anomalías	X	X	-
Clasificación	Redes Neuronales	X	X	X
	K-vecinos más cercanos	X	-	-
	Arboles de decisión	X	-	-
	Bosques aleatorios	X	X	-
	SVM	X	X	-
	Naive Bayes	X	-	-

Las **redes neuronales** están inspiradas en las redes neuronales biológicas (**Fig. 7**), pretenden imitar su comportamiento a través de algoritmos matemáticos que ofrecen una respuesta aproximada a como lo hacen las originales. Se utilizan en problemas de clasificación y regresión, además tienen un gran potencial para resolver problemas complejos y son especialmente certeros en detectar patrones.

Las redes neuronales consisten en una interconexión de nodos llamadas neuronas y divididas en capas en las cuales distinguimos una capa de entrada, un número de capas ocultas o intermedias y una capa de salida. Cada neurona de la capa oculta tiene un número de entradas determinada por el número de neuronas de la capa anterior y un número de salidas correspondiente al número de neuronas de la capa superior, por otro lado, los *inputs* en la capa de entrada son las propias variables a analizar (x) y los *outputs* de la capa de salida serán los resultados del sistema (y).

Cada conexión entre neuronas tiene asociado un peso (w). Este peso representa la importancia que tendrá esa relación en la neurona al multiplicarse por el valor de entrada. Los valores iniciales para los pesos se asignan automáticamente. Por otro lado, tenemos el umbral o umbral de activación (u), el valor del umbral afecta directamente al valor que tomará la salida de la neurona. Si el valor es muy grande negativamente, la neurona se excitará al máximo y dará una salida de 1 independientemente de lo que haya en las entradas. Si el valor es muy grande positivamente, la neurona no se excitará en absoluto y dará una salida de 0 independientemente de lo que haya en las entradas. Cada neurona tiene una función de activación que determina si la suma de los valores recibidos, multiplicados por el peso de cada conexión, supera un umbral que hace que la neurona se active o no y proporcione un valor a la siguiente capa de neuronas (a).

Al final de este proceso iterativo obtendremos una o varias salidas al final de la red, usaremos una función para comparar que tan buenos o malos son los resultados obtenidos comparados a los resultados reales esperados, a esta función se le llama Función Coste. Idealmente queremos que esta función coste tenga el valor más pequeño posible. A medida que se entrena el modelo se irá ajustando los pesos de inter-conexión entre las neuronas de manera automática hasta obtener buenas predicciones.

Para el ajuste de los pesos se usará un modelo matemático llamado descenso de gradiente el cual pretende encontrar el mínimo de una función, en nuestro caso, la utilizaremos para encontrar el mínimo de la Función Coste. Su funcionamiento consiste en ir en contra de la derivada de la función, de esta manera podemos asegurarnos que partiendo de un valor inicial y teniendo en cuenta la derivada negativa, el próximo valor va a disminuir. Al calcular la derivada (o gradiente) de la Función Coste en un cierto conjunto de pesos, podremos

ver la dirección en la cual «descender» hacia el mínimo global. La actualización del valor de los pesos se realizará automáticamente usando el descenso de gradiente.

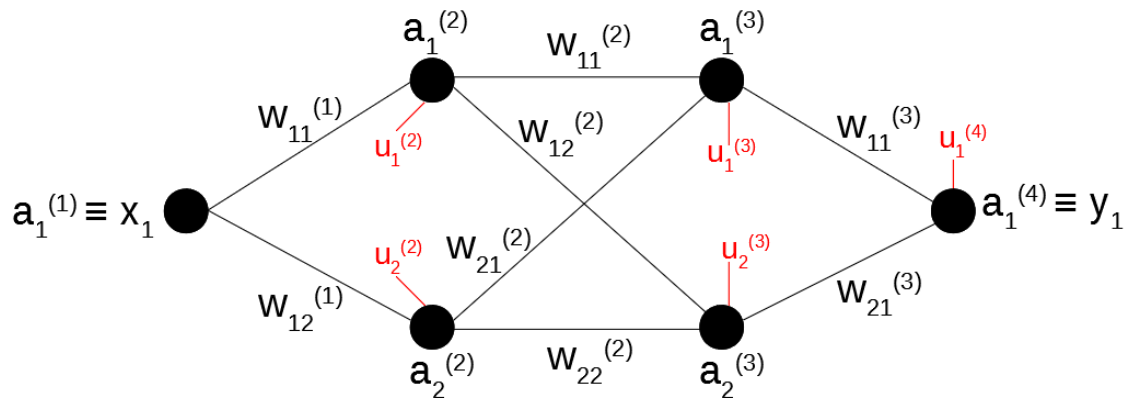


Figura. 7. Ejemplo de red neuronal

La utilidad del algoritmo **K-vecinos más cercanos** es la de clasificar valores buscando aquellos datos que son similares por cercanía e intentar identificar nuevos puntos basados en esa clasificación. La 'K' hace referencia al número de vecinos más cercanos que comparten características similares para realizar la comparación y poder clasificarlos. Esa clasificación la realiza basada en instancias (**Fig. 8**), esto quiere decir que el algoritmo no aprende un modelo como tal, sino que memoriza las instancias de entrenamiento y son usadas como base de conocimiento para la predicción de futuros datos.

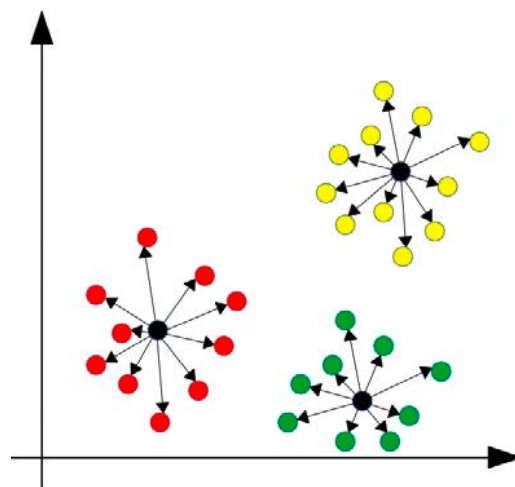


Figura. 8. Ejemplo de clasificación por instancias

Los **árboles de decisión** y **bosques aleatorios** son algoritmos parecidos a los algoritmos basados en reglas del tipo *if, this, then, that*. Son llamados de esta manera ya que tienen un primer nodo llamado raíz, que incluye una prueba a una variable, luego se descompone en ramas que representan el resultado de la prueba y nodos hoja que representan la clasificación (**Fig. 9**). El aprendizaje mediante árboles de decisión es un método de aproximación de una función objetivo de valores discretos en el cual la función objetivo es representada mediante un árbol de decisión. Este tipo de algoritmos ayuda a la toma de decisiones más acertada desde un punto de vista probabilístico. Los bosques aleatorios utilizan una serie de árboles de decisión con el fin de mejorar la tasa de clasificación.

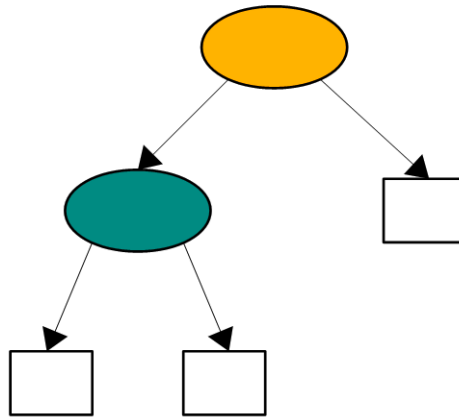


Figura. 9. Ejemplo de árbol de decisión

El objetivo de las **máquinas de vectores de soporte (SVM)** es separar varios conjuntos de datos de características diferentes, y por tanto pertenecientes a clases distintas, para clasificarlos mediante la búsqueda de un hiperplano que de la distancia mínima más grande entre los diferentes conjuntos de datos (**Fig. 10**). La distancia que separa ambos conjuntos de datos es conocida como margen, cuanto mayor sea esta distancia más facilidad tendrá el algoritmo para diferenciar las diferentes clases que existan.

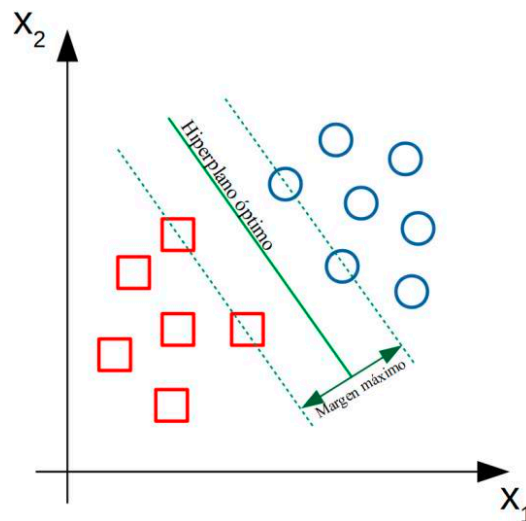


Figura. 10. Hiperplano para separar conjuntos de datos

Por último, tenemos los clasificadores bayesianos o también conocido como Naive Bayes, este tipo de algoritmos utilizan expresamente el Teorema de Bayes de probabilidad para resolver problemas de clasificación (**Fig. 11**). Se trata de una técnica que construye modelos que predicen la probabilidad de posibles resultados basado en probabilidades condicionadas entre variables.

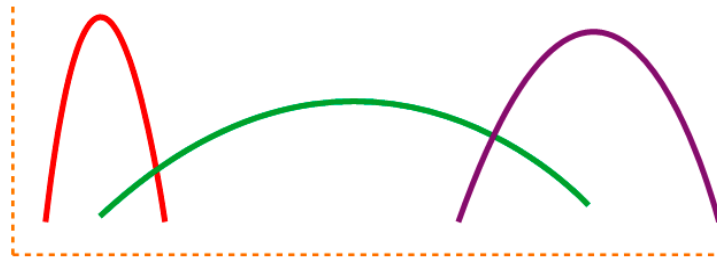


Figura. 11. Ejemplo de clasificador Bayesiano

5. Conclusión

La comparativa realizada con algoritmos de aprendizaje supervisado y no supervisado refleja la existencia de un gran repertorio de técnicas para el análisis de datos y la importancia que supone su conocimiento para adaptar la estrategia de resolución de un problema concreto que se plantee. Por tanto, podemos decir que el uso de técnicas asociadas al aprendizaje automático para la clasificación de datos (algoritmos de clasificación), predicción de tendencias (algoritmos de regresión) y agrupación por características (*clustering*) son de gran utilidad para resolver los problemas que se plantean en CESADAR sobre predicción de eventos en equipos de plataforma naval.

Referencias bibliográficas

- [1] J. D. G.-A. Lacalle and F. L. López, "Evolución del centro de supervisión y análisis de datos de la armada (CESADAR)," p. 14, 2018.
- [2] D. E. Negocios, "Uso De Técnicas De Web Mining: Aplicación Empírica En El Sector De La Administración Pública," 2013.
- [3] © Google, "Google Trends," 2019. [Online] Available:<<https://trends.google.es/trends/?geo=ES>>.
- [4] P. A. Flach, "Machine learning: the art and science of algorithms that make sense of data," p. 396, 2012.
- [5] T. M. Mitchell, *Machine Learning*. McGraw-Hill, 1997.
- [6] A. Géron, *Géron - 2017 - Hands-On Machine Learning with Scikit-Learn and TensorFlow.pdf*. O'Reilly Media, 2017.
- [7] "Modelos Probabilísticos para la Inteligencia Artificial y la Minería de Datos," Universidad de Almería, 2007.

SISTEMAS DE APOYO A LA DECISIÓN EN INDUSTRIA NAVAL

D. P. PÉREZ SABATER

*Estudiante de Máster en Ingeniería Naval y Oceánica en prácticas UPCT (Ing.Tec), Armada española,
Arsenal de Cartagena-CESADAR (Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada),
Cartagena, España*

AN (CIA) D. F. LAMAS LÓPEZ

*Responsable técnico CESADAR-Central (Dr. Ing.), Armada española,
Arsenal de Cartagena-CESADAR (Centro de Supervisión y Análisis de Datos de la Armada),
Cartagena, España*

Resumen: La tendencia actual en la industria es buscar los mejores métodos para mantenerse en lo alto de la competencia, para ello se busca reducir el coste de mantenimiento de los activos, mejorar su rendimiento y extender su vida útil. Este objetivo resulta más próximo cuanto más información útil se tenga y de esa forma poder gestionar su ciclo de vida de manera óptima. Para ello deben tomarse decisiones que permitan un control eficiente y una gestión óptima del ciclo de vida.

Por estos motivos surgió el desarrollo de los Sistemas de Apoyo a la Decisión (Decision Support Systems), aplicado a nuestro campo de estudio, la industria naval, un DSS consiste en un sistema de información computarizado que contiene conocimiento analítico específico del estado de salud del activo, modelos analíticos de decisión para ayudar al responsable de la gestión del activo a realizar su tarea presentando información útil que le permita manejar el activo de forma que su ciclo de vida resulte óptimo.

El problema fundamental de la investigación en la construcción de un sistema inteligente de apoyo a la decisión (IDSS) implica vincular el conocimiento específico del dominio de los expertos con el poder normativo de las técnicas de decisión analítica para mejorar la calidad de las decisiones.

En este documento se describe el concepto de DSS y sus usos, así como una de sus técnicas principales, el IVHM (Integrated Health Management) y se exponen diferentes ejemplos de usos del mismo en industria naval.

Palabras clave: Decision Support Systems; Integrated Health Management; IVHM; CBM; Sistemas de apoyo a la decision; mantenimiento basado en la condición, Apoyo al ciclo de vida.

1. Introducción

Como se comenta en *Duncan et al.* [1] la globalización en el mundo actual hace que las empresas deban maximizar todas las ventajas posibles para mantenerse a la par de su competencia. Por lo tanto, las industrias deben reducir costos, cumplir con los objetivos de rendimiento y producción más estrictos, cumplir con los requisitos reglamentarios y maximizar el rendimiento de los activos. Se busca pues, reducir el costo de mantenimiento de activos, mejorar el rendimiento y extender la vida útil de los mismos, y de esta forma obtener una ventaja competitiva a lo largo de su ciclo de vida. Estos objetivos hacen que resulte muy importante el área de Gestión de Activos (AM).

La gestión de activos, como instalaciones y equipos, puede ser una tarea desafiante y optimizar su uso es fundamental. Por ejemplo, decisiones como la programación de eventos de mantenimiento tienen un impacto crítico en la utilización y efectividad general del equipo de los activos. Por lo tanto, las empresas que

simplemente consideran el mantenimiento eficiente y la administración de activos como un costo inevitable están descuidando una de las oportunidades estratégicas más importantes disponibles [2].

Sin embargo, debemos tener en cuenta que, aunque la programación efectiva del mantenimiento desempeña un papel importante, en realidad es solo una de las decisiones en la administración de un activo durante su ciclo de vida. Al administrar activos, los responsables de tomar decisiones como ingenieros, gerentes de negocios, etc. deben asegurarse de que los activos operan en los niveles máximos de rendimiento y, al mismo tiempo, mantener bajos los costos de capital y mantenimiento. Para garantizar el uso efectivo de un activo, uno tiene que tomar decisiones efectivas con respecto a las fases del ciclo de vida de los mismos. En consecuencia, es imperativo recopilar información útil sobre los activos a lo largo de su ciclo de vida para una gestión y control eficientes [3]. Después se requiere un conjunto de información como especificaciones de diseño, datos de confiabilidad, ubicación, tasa de uso, condiciones ambientales para tomar decisiones efectivas que apunten a maximizar su utilización a lo largo de la vida del activo.

El trabajo de desarrollo de los DSS comenzó en la década de 1960 [4], se han desarrollado una serie de herramientas computacionales para DSS, como la base de conocimientos [5],[6], el proceso de jerarquía analítica [7],[8], las redes de Petri [9], las redes neuronales [10],[11]; la lógica difusa y las redes difusas [12], , y la teoría bayesiana [13][14][15]. Estas herramientas computacionales han permitido a los DSS volverse más inteligentes al incorporar el poder normativo de las técnicas analíticas.

En la actualidad, la investigación en DSS generalmente ha evolucionado con respecto a tres perspectivas: diseño, aplicación y tecnología.

- I. La perspectiva del **diseño** pone énfasis en el desarrollo de metodologías y estrategias que se extienden a lo largo de todo el proceso, desde el reconocimiento y análisis de problemas a través de las especificaciones del sistema hasta la implementación de computadoras.
- II. El problema de la **aplicación** se centra en el uso de DSS por parte de individuos y grupos.
- III. La perspectiva **tecnológica** se centra en la interacción hombre-máquina y el desarrollo de entornos de software.

El problema fundamental de la investigación en la construcción de un sistema inteligente de apoyo a la decisión (IDSS) implica vincular el conocimiento específico del dominio de los expertos con el poder normativo de las técnicas de decisión analítica para mejorar la calidad de las decisiones.

El objetivo de este capítulo será recopilar los usos y facilidades que proporciona la implantación de los DSS en industria naval, centrándonos en su aplicación como técnica de monitorización de salud de los equipos, en concreto el IVHM (Integrated Health Management).

2. Aplicación de IVHM en industria naval

El concepto de gestión integrada de la salud del vehículo (IVHM) es una evolución de los sistemas de diagnóstico y pronóstico de salud de los equipos que mencionábamos antes [16], [17]. El objetivo es implementar una estrategia avanzada de administración de salud y pronóstico (PHM, por sus siglas en inglés) que permita una monitorización continua y evaluación en tiempo real de la salud funcional del activo, predice la vida útil restante del fallo o los componentes cercanos al fallo, y usa esta información para mejorar las decisiones operativas. Aquí, las operaciones de mantenimiento se benefician de la reducción de las incidencias de fallos inesperadas, ya que el sistema de gestión de la salud proporcionará una identificación temprana de los precursores de fallos mientras que, al mismo tiempo, se habilita el mantenimiento basado en la condición (CBM), que puede mejorar la disponibilidad, la confiabilidad de la misión, la vida útil del sistema y la accesibilidad (por ejemplo, referencias [16] y de [18] a [19])

La gestión integrada de salud del vehículo (IVHM) [20] fue identificado por la NASA Office of Space Flight como la tecnología de mayor prioridad para el presente y futuro del espacio de sistemas y transportes. Estos sistemas altamente integrados también incluirán sensores avanzados de inteligencia, diagnósticos y pronósticos software para sensores y componentes, modelos de sistemas basados en razonamiento para niveles de manejo de sistemas y subsistemas, planificadores de mantenimiento y misiones avanzadas con base a bordo o en el suelo, y una variedad de otras tecnologías de software y hardware. Estas tecnologías de software y hardware serán incluidas en los subsistemas del vehículo, operaciones de mantenimiento, y los elementos de lanzamiento y operación, y proveerá ambos el tiempo real e información del estado del ciclo de vida del vehículo el cual permitirá tomar decisiones con información del manejo de logística. Los bancos de datos conocidos del ciclo de vida de los vehículos serán actualizados y reportados continuamente sobre averías críticas de funcionamiento, y rutinariamente actualizados y reportados para condición y dirección del ciclo de vida del vehículo rápido reconocimiento de operación fuera de lo nominal para posibilitar una más rápida acción correctiva. Este será el resultado del sistema IVHM proveyendo mejor información (en vez de solamente datos) que producirá un aumento significativo de seguridad en los vehículos y para los tripulantes, e incrementar la posibilidad de la finalización de la misión.

3. Uso del IVHM como tecnología para reducción de coste en construcción naval

Los buques de guerra son activos navales que pueden ser llamados a realizar tareas para las que no fueron diseñados inicialmente. Su ciclo de vida se ve influenciado por los requisitos militares impuestos por las Armadas que contratan su construcción. En ocasiones es común invertir menos recursos en mantenimiento predictivo para reducir costes en Jiang et al [21] se investigan los beneficios potenciales de incorporar la gestión de salud para las etapas de prueba y puesta en servicio en la construcción naval para reducir el costo general de un programa de embarcaciones.

Para ello desarrollaron una herramienta de planificación de escenarios para evaluar los beneficios de integrar el IVHM en la construcción naval. La herramienta creada relaciona el tiempo, el coste y la calidad en diferentes escenarios de fabricación con o sin IVHM.

El estudio se realizó a través de AnyLogic, una plataforma de simulación que combina tres métodos de modelado: Modelado dinámico del sistema, modelado de eventos discretos y modelado basado en agentes (modelado computacional que se emplea para simular acciones e interacciones entre entidades individuales o grupales y analizar sus efectos considerados como un todo). Este software se ha utilizado en diferentes aplicaciones en la cadena de suministro y logística, fabricación y transporte.

Datos y parámetros de entrada.

La tabla 1 muestra los tres tipos de datos definidos en el escenario de simulación.

Los parámetros introducidos son los datos de calidad y tiempo relacionados con las pruebas, fallos y costes. Los KPI son las medidas comerciales para analizar la eficacia de IVHM.

Tabla 2. Escenario del modelo de datos de entrada y salida

Programas de los buques (Datos de entrada)	Parámetros (Datos de entrada)	Puntos clave (Datos de salida)
Características para modelar (Rango de escenarios)	Parámetros a variar para el análisis costo / beneficio. Ratio de fallo	Indicadores clave
Número de buques	Tiempo de detección	Tiempo
Variedad de buques	Tiempo de diagnóstico	
Prueba de superposición	Tiempo de reparación	Coste
Complejidad del Sistema	Ratio de falsa alarma	
Grado de implementación de IVHM	Ratio de fallo crítico	
Número de astilleros	Coste externo	Calidad
Línea base de la lección aprendida	Coste normal de reparación	
Factor de corrección	Coste de rediseño	

Estos datos de entrada y salida se analizan a través de los tres métodos anteriormente mencionados, y se generan las medidas de rendimiento que se utilizan para calcular los costes relacionados con las pruebas. Esto incluye el coste de inversión de IVHM; coste externo causado por fallos no detectados; y costes de reparación por fallos detectadas.

Se utilizan tres grupos de KPI para medir los beneficios de añadiendo IVHM

Coste por barco: este es el coste de la etapa de prueba y puesta en servicio de la construcción naval, no el coste total del barco. El coste de prueba de cada barco se calcula a partir del coste de la instalación, el coste de la mano de obra, etc. Cuando se identifican fallas en las pruebas, se agregara el coste de rediseño y remanufactura.

Duración de la prueba por barco: este es el tiempo que la nave está en prueba. Se construye a partir del tiempo real para realizar la prueba, y el tiempo de diagnóstico cuando se detecta un fallo. IVHM podría reducir la duración de la prueba con el uso de sensores inteligentes y análisis, y mejorar las lecciones aprendidas de los datos de prueba retenidos.

Calidad por barco: los KPI de calidad tienen dos grupos. La calidad externa son las fallas no detectadas que se pasan al cliente. La calidad interna mide las fallas inherentes en el barco antes de que comience el proceso de prueba, las fallas que se detectan como fallas en la prueba y la calidad de las pruebas. Se refleja en el

modelo como el número promedio de fallas no detectadas, tasas de falla y falsas alarmas de la nave durante la prueba.

A continuación se analizan los parámetros con el modelo lógico de donde se deducen varios casos.

Para una prueba en particular donde no se detecta una falla, la prueba pasa con éxito y continúa con la siguiente prueba.

En los casos en que se produce un fallo y no se detecta, esto se conoce como un fallo no detectado que puede ocurrir después de la entrega del envío al cliente. Esto es indeseable, ya que resultará en un costo externo de fallo que puede tener una garantía costosa.

En los casos en que se detecte el fallo, el personal de prueba deberá evaluar si se trata de una falsa alarma. Si se trata de una falsa alarma, se considera que la prueba se aprobó con las lecciones aprendidas registradas.

Para los casos de un fallo verdadero, el personal de prueba pasará a un proceso completo de aislamiento de fallas para determinar la causa raíz de la falla y si es una falla crítica.

Para un fallo no crítico, la reparación del defecto se puede posponer o diferir y la reparación se puede llevar a cabo en un momento conveniente que no demore el programa de prueba general del barco. Esto es aplicable a fallos simples y también se considera que la prueba ha pasado con las lecciones aprendidas registradas.

Para un fallo crítico, se realiza una reparación rápida y se repite la prueba, con las lecciones aprendidas registradas.

Con estos datos registrados y los procesos del modelado lógico se obtienen las siguientes conclusiones:

Se observó que el coste promedio de prueba por barco es mayor con el IVHM implementado al 3% y al 5% que sin IVHM, cuando la cantidad de buques es baja. El punto de inflexión en este caso de estudio se produce con 9 buques para un IVHM al 3%, 6 buques para IVHM al 5% y 3 para IVHM al 10%. También a medida que aumenta el número de buques, hay diferencias más pequeñas en el coste entre IVHM al 5% y al 10%

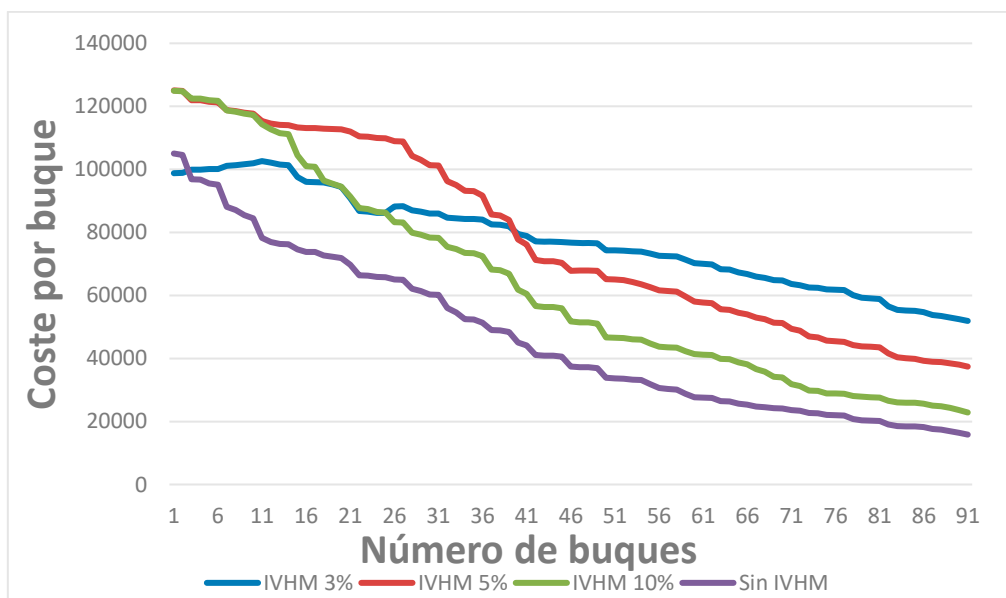


Figura 1. Cost Vs Number of ships. Gráfico adaptado de [24]

Se observa que el tiempo promedio de realización de pruebas de apoyo al ciclo de vida por barco es menor con la implementación del IVHM al 3% y al 5% que sin IVHM.

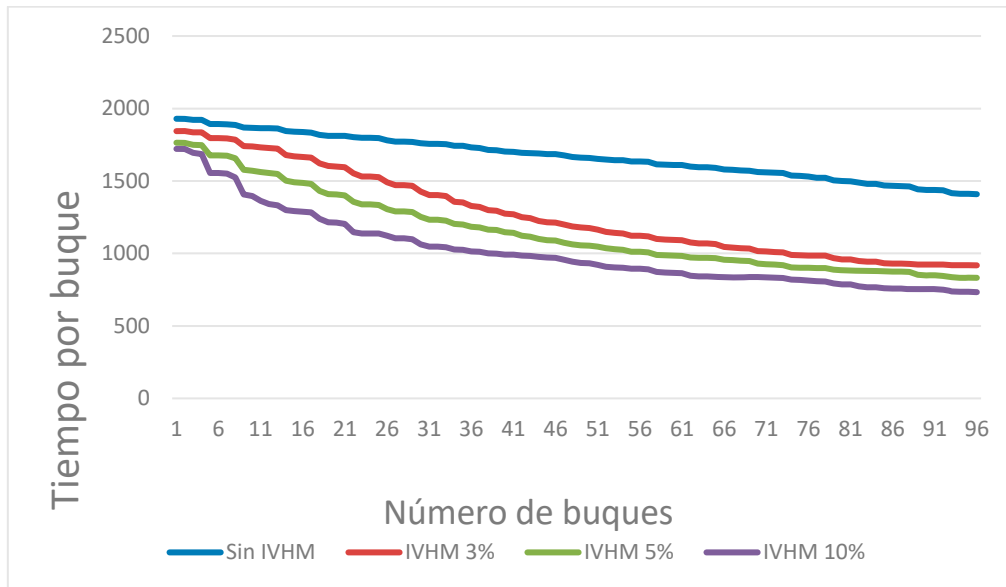


Figura 2. Time per ship Vs number of ships. Gráfico adaptado de [24]

El tiempo de prueba por barco se reduce a medida que aumenta el nivel de implementación de IVHM y el número de embarcaciones. De manera similar, a medida que aumenta el número de barcos, hay diferencias más pequeñas en el beneficio de tiempo entre IVHM implementado al 3% y al 10%.

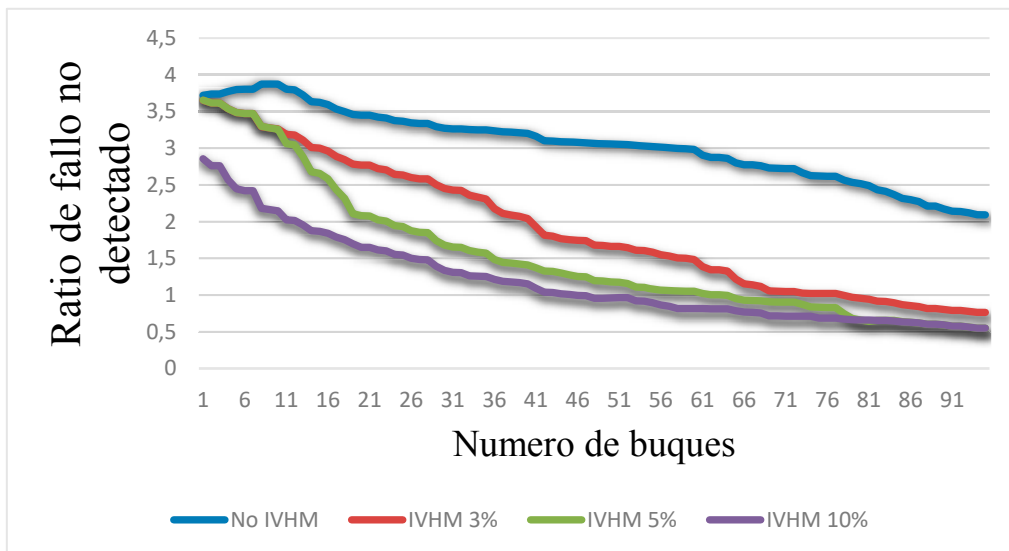


Figura 3. Undetected Failures vs Number of Ships. Gráfico adaptado de [24]

Aquí se muestra la tasa de fallo no detectada entre IVHM implementado al 3% y al 10%. De hecho, la tasa de fallo no detectada es casi la misma para el IVHM implementado al 5% y al 10%.

El resultado de los tres escenarios muestra un potencial positivo y rentable en la inversión de implementación del IVHM para los constructores de buques en lugar de considerar la posibilidad de cubrir toda la vida útil a base de mantenimiento tradicional con un mantenimiento preventivo o correctivo únicamente.

4. Uso de IVHM en sistemas de propulsión navales

Dentro de la NASA en el Glenn Research Center, Ames Research Center and Kennedy Space Center [22] desarrollaron el Propulsion IVHM Technology Experiment, o (PITEX) para comprobar y demostrar los beneficios de coordinar la gestión de la salud de los subsistemas del equipo de propulsión mediante esta tecnología. Se demostró que se puede detectar con éxito las tasas de fallo a través de algoritmos de diagnóstico avanzados, que se ejecutan en las computadoras de vuelo.

El esfuerzo actual de PITEX tiene un legado considerable en el Experimento Tecnológico IVHM de la NASA para vehículos X (NITEX), seleccionado para volar en el RLV de subescala X-34 que estaba siendo desarrollado por Orbital Sciences Corporation.

El sistema de demostración está diseñado para probar un subconjunto de componentes de software de la arquitectura del experimento de vuelo NITEX. El sistema de demostración presenta datos del sistema de propulsión simulada que están siendo procesados por el software de diagnóstico en una RGU y muestran el contenido compartido en una GPU.

En la figura 4 se muestra la arquitectura del software NITEX.

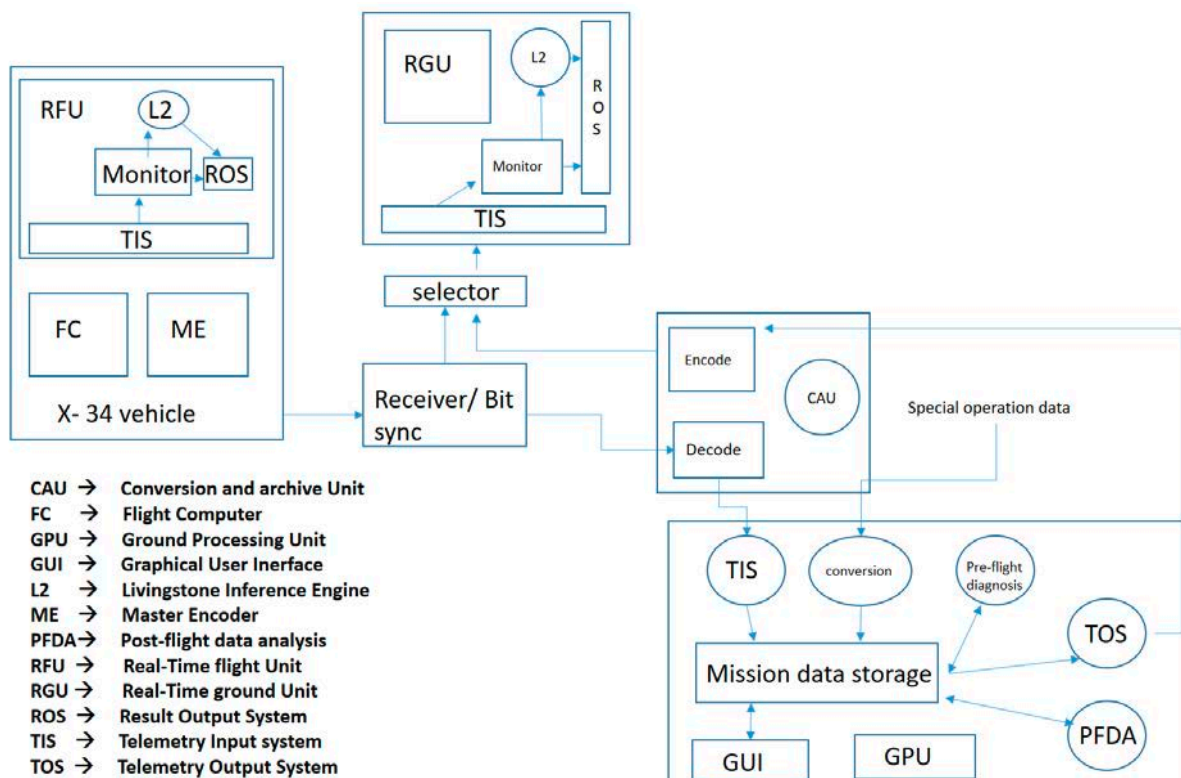


Ilustración 4. Arquitectura funcional de NITEX.

PITEX ha demostrado con éxito la detección de fallos basada en modelos en tiempo real de un sistema de propulsión principal virtual. La arquitectura de demostración de PITEX incluía tanto una caja de aviónica como

de vuelo y una Unidad de procesamiento en tierra. Se implementaron elementos de software específicos y se centraron en el diagnóstico de nivel de sistema en tiempo real. La Interfaz de tiempo para ordenar y transmitir eventos y solicitar diagnósticos, y Livingstone, el motor de diagnóstico responsable de inferir el estado del MPS.

La arquitectura de demostración fue parte de una arquitectura más grande que fue diseñada para cubrir todas las fases de la misión y ambas en evaluaciones de la placa y en tierra.

Durante la prueba del software en hardware similar a un vuelo, se descubrió que las CPU empleadas (CPU y memoria) estaban en gran parte infrautilizadas. Esto indica que la solución de diagnóstico PITEX podría manejar aplicaciones más complejas.

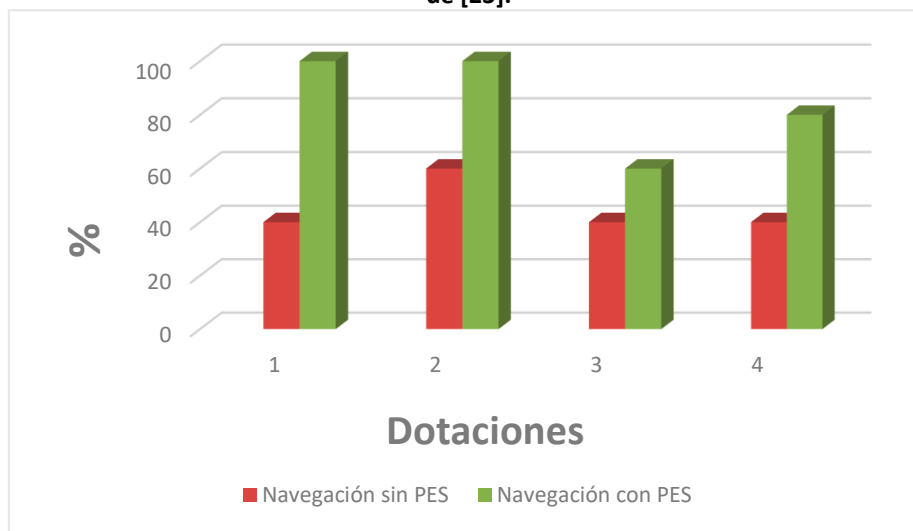
5. Sistemas de apoyo a la decisión en navegación.

En las últimas décadas el tonelaje de los buques ha aumentado, a su vez las tareas que debe desempeñar un oficial en el puente de mando son cada vez más numerosas, esto sumado a la disminución de dotación que se produce en los buques hace necesario un apoyo extra. Por estas razones Grabowski y Wallace. [23] estudiaron la implementación del ESPS (*Expert System Pilot System*), un sistema operativo experto, empleado en pilotaje a bordo, que brindaba apoyo en la toma de decisiones a los oficiales del buque en el puente de mando mientras gobiernan grandes embarcaciones en aguas restringidas.

El objetivo es reducir la sobrecarga de información bajo la cual trabajan estos oficiales.

Se realizaron dos escenarios de simulación, navegación asistida por sistemas de apoyo a la decisión y navegación sin el apoyo de estos sistemas; para cuatro grupos de dotación diferente, se registró el porcentaje de maniobras realizadas para un adecuado gobierno, realizadas con y sin el sistemas experto PES en la tabla 1 queda reflejado el porcentaje de maniobras realizadas de forma adecuada.

Tabla 3 Influencia del PES* en el seguimiento del rendimiento del equipo: número de órdenes del timón. Adaptada de [23].



*Pilot Expert System.

Puede observarse que el porcentaje de procedimientos completados es mayor con el uso del PES.

6. Conclusiones y perspectivas

Este artículo ha expuesto un amplio estado del arte y referencias bibliográficas sobre técnicas ligadas a la toma de decisiones inteligentes en distintos tipos de industria.

La información recopilada en este documento muestra que el grado de avance en el desarrollo de la tecnología de gestión de equipos ha avanzado rápidamente en los últimos años, y que cada vez este tipo de técnicas de gestión son aplicadas por un mayor número de industrias y en varios campos de las mismas.

En industria naval queda reflejado que este modo de mantenimiento, y este tipo de gestión tecnológica, es útil para diferentes usos y como es cierto que ofrece numerosos beneficios en las tomas de decisión en tiempo real a bordo.

El camino que queda por recorrer es largo, pues los usos y aplicaciones de esta tecnología son amplios. Aún está por descubrir qué nuevas aplicaciones pueden desarrollarse y cómo mejorar los sistemas que existen actualmente.

Queda abierto a la investigación la dificultad fundamental en la construcción de un sistema inteligente de apoyo a la decisión (IDSS) que implique vincular el conocimiento específico del dominio de los expertos humanos (en un campo logístico concreto) con el poder normativo de las técnicas de decisión analítica con el objeto de mejorar la calidad de las decisiones.

Referencias bibliográficas

- [1] M. Z. Ouertani, A. K. Parlikad, and D. Mcfarlane, "Towards an Approach To Select," *J. Comput. Sci.*, vol. 5, no. 3, pp. 25–44, 2008.
- [2] SAP White Paper., "MySAP product lifecycle management – asset life-cycle management," 2003.
- [3] and K. O. M. Burkett, J. Kemmeter, "Product Lifecycle Management: What's real now?," 2002.
- [4] W. Huaqing, "Ingt Ni!!!," *Expert Syst. Appl.*, vol. 12, no. 3, pp. 323–335, 1997.
- [5] A. Borden, *Designing and maintaining decision-making processes*. 1993.
- [6] M. J. Liberatore and A. C. Stylianou, "Using knowledge-based systems for strategic market assessment," *Inf. Manag.*, vol. 27, no. 4, pp. 221–232, 1994.
- [7] T. Saaty, "Case M . 7818 – McKesson / UDG Healthcare (Pharmaceutical Wholesale and Associated Businesses) Only the English text is available and authentic .," vol. 9, no. 139, 2016.
- [8] M. A. P. Davies, "A multi-criteria decision model application for managing group decisions," pp. 47–58, 1994.
- [9] C. Kocourek, "A Petri net based design decision support system," 1993, pp. 108–14.
- [10] B. Hurson,A.R; Pakzad, S; Lin, *Automated knowledge acquisition in a neural network based decision support system for incomplete database systems*. 1994.
- [11] Q. Tong-Seng, C. L. Tan, H. H. Teh, and B. S. Srinivasan, "Utilizing a neural logic expert system in currency option trading," *Expert Syst. Appl.*, vol. 9, no. 2, pp. 213–222, 1995.
- [12] A. Ishikawa, "The new fuzzy Delphi methods: economization of GDS (group decision support)," no. December 1990, pp. 255–264, 2002.

- [13] P. G. W. Keen, "Value Analysis: Justifying Decision Support Systems," *MIS Q.*, vol. 5, no. 1, p. 1, 2006.
- [14] E. Charniak, "without Tears," vol. 12, no. 4, 1991.
- [15] W. C. Ellis and V. M. Rao Tummala, "Minimum Expected Loss Estimators of the Shape & Scale Parameters of the Weibull Distribution," *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 35, no. 2, pp. 212–215, 1986.
- [16] T. B. Company, "Benefits of IVHM: An Analytical Approach," pp. 1–9, 2006.
- [17] K. M. Janasak and R. R. Beshears, "Diagnostics to prognostics - A product availability technology evolution," *2007 Proc. - Annu. Reliab. Maintainab. Symp. RAMS*, pp. 113–118, 2007.
- [18] B. Byer, A. Hess, and L. Fila, "Writing a convincing cost benefit analysis to substantiate autonomic logistics," *IEEE Aerosp. Conf. Proc.*, vol. 6, pp. 63095–63103, 2001.
- [19] N. N. Zuniga, F. A., Maclise, D. C., Romano, D. J., Jize and D. P. Wysocki, P. F., and Lawrence, "Integrated systems health management for exploration systems," in *1st Space Exploration Conference*, 2005, pp. 679–694.
- [20] National Aeronautics and Space Administration (NASA), "Research and technology goals and objectives for integrated vehicle health management (IVHM)."
- [21] J. Jiang, I. S. Fan, M. A. Muriel, P. F. J. Wen, C. Rua, L. Yuanji, P. Loizillon, and J. M. Mielnicka, "Simulation Modelling for Scenario Planning to Evaluate IVHM Benefit in Naval Ship Building," *Procedia CIRP*, vol. 59, no. TESConf 2016, pp. 178–183, 2017.
- [22] A. K. Chicatelli, W. A. Maul, and C. E. Fulton, "Propulsion IVHM Technology Experiment," vol. 2, no. July, pp. 859–868, 2006.
- [23] M. Grabowski and W. A. Wallace, "An Expert System for Maritime Pilots: Its Design and Assessment Using Gaming," *Manage. Sci.*, vol. 39, no. 12, pp. 1506–1520, 2008.



BIOGRAFÍA¹

Churruca y Elorza, Cosme Damián de

Cosme Damián Churruca y Elorza (Motrico, 27 de septiembre de 1761 – batalla de Trafalgar, 21 de octubre de 1805) fue un científico, marino y militar español, brigadier de la Real Armada y alcalde de Motrico.

Se distinguió en la batalla de Trafalgar al mando del navío de línea San Juan Nepomuceno, a bordo del cual encontró la muerte.

Cursó sus primeros estudios en el Seminario Conciliar de Burgos, pensando en un primer momento en ordenarse sacerdote. A continuación ingresó en la Escuela de Vergara, que poco más tarde daría origen al Real Seminario de Vergara y que fue fundado por la Real Sociedad Vascongada de Amigos del País, de la que sería miembro hasta su muerte.

Concluidos sus estudios, volvió a casa de sus padres en solicitud de su venia para emprender la vida de marino. El 15 de junio de 1776 ingresó en la Academia de Cádiz como guardiamarina graduándose en la Academia de Ferrol en 1778. Tuvo su primera misión militar en el asedio a la Gran Bretaña por la escuadra combinada francoespañola estacionada en Brest.

Posteriormente estuvo en el asedio de Gibraltar de 1781. En 1788 acompañó al capitán de navío Antonio de Córdoba en las exploraciones del estrecho de Magallanes.

En 1789 fue agregado al Observatorio de la Marina de San Fernando.

Desde 1792 a 1795 dirige junto con Joaquín Francisco Fidalgo como capitanes de fragata, una expedición geográfica a América del Sur, formada por dos secciones, una de las cuales debía recorrer las islas y costas del golfo mexicano y la otra el resto de las del continente, con el fin de formar el atlas marítimo de la América Septentrional.

En noviembre de 1803 se le dio el mando del navío Príncipe de Asturias.

Revisó en compañía de Antonio Escaño, el Diccionario de Marina.

El gobierno le encargó que hiciera experiencias de puntería; como resultado redactó un tratado de puntería para la Armada.

Murió en la batalla de Trafalgar al mando del navío de San Juan de Nepomuceno

¹ <http://www.larramendi.es/vc ilustrados/es/consulta_aut/registro.do?id=64802>

